Simulationsbasiertes Mehrebenen-Planungswerkzeug für geothermische Wärmepumpensysteme

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sebastian Weck-Ponten, geb. Weck

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck
Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff

Tag der mündlichen Prüfung: 18.09.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Kurzzusammenfassung

Wärmepumpen und die oberflächennahe Geothermie werden zukünftig eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung des Gebäude- und Wärmesektors einnehmen. Die oberflächennahen geothermischen Potenziale werden bislang, insbesondere aufgrund der hohen Planungs- und Genehmigungskomplexität sowie hoher Investitionskosten, nicht ausgeschöpft. Darüber hinaus entstehen durch die verschiedenen an der Planung beteiligten Akteure Schnittstellen, die wiederum zu Transferlücken und Hürden für eine optimierte Systemdimensionierung führen können. Zur Hebung der Potenziale und Optimierung der Systemdimensionierung sind ein ganzheitlicher Planungsprozess und die Kombination von verschiedenen Planungswerkzeugen notwendig, die u. a. geothermische Standortbewertungen, die Abbildung der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Erdwärmesonden und deren Auswirkungen auf Nachbargrundstücke sowie die Bewertung geothermischer Wärmepumpensysteme unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Entscheidungsparameter ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund wird ein simulationsbasierter Mehrebenen-Planungsansatz vorgestellt, der die ganzheitliche Planung geothermischer Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden auf den Skalen von Einzelgebäuden bis auf Quartiersebene in den frühen Planungsphasen ermöglicht. Durch die Integration von Berechnungswerkzeugen zur Abbildung des Ober- und Untergrunds in eine geschlossene Simulationskette können vorhandene Transferlücken zwischen verschiedenen Gewerken überwunden werden.

Mithilfe eines prototypisch umgesetzten Systemkonfigurators können geothermische Wärmepumpensysteme detailliert dimensioniert, mit konventionellen Systemen verglichen sowie anhand von technischen, energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien bewertet werden. Die Kombination aus Konfiguration, unmittelbarer Ergebnisdarstellung und automatisiert angesteuerten sowie im Hintergrund laufenden Simulationen ermöglicht einen iterativen und praxistauglichen Dimensionierungsprozess. In diesem Zuge wird ein auf die Funktionalitäten des Systemkonfigurators abgestimmtes und auf den frühen Planungsprozess spezialisiertes Wärmepumpensystemmodell vorgestellt, das thermische Speicherbilanzen und Regelungsalgorithmen enthält, auf Stadtquartiersebene einsetzbar und mit Untergrundmodellen bidirektional koppelbar ist.

Die Anbindung der Simulationskette an ein bestehendes Web- und GIS-basiertes Geoportal samt Datenbanken ermöglicht eine zentrale Datenaggregation sowie geothermische Standortbewertungen. Dadurch können der Antrags- und Genehmigungsprozess von oberflächennahen geothermischen Systemen und ganzheitliche Planungsansätze wie die kommunale Wärmeplanung werkzeugbasiert unterstützt werden.

Abstract

In future, heat pumps and shallow geothermal energy will play a central role in the decarbonization of the building and energy sector. The potentials of shallow geothermal energy have not been exploited so far, in particular due to the high complexity of planning and approval processes. In addition, the various stakeholders involved in the planning process create interfaces, which can lead to transfer gaps and barriers for an optimized system design. In order to raise the potentials and optimize the system design, a holistic planning process and the combination of different planning tools are necessary, which enable, among other things, geothermal site evaluations, the representation of the mutual thermal influence of geothermal borehole heat exchangers and their effects on neighboring properties, as well as the evaluation of geothermal systems under consideration of economic and ecological decision parameters.

In this context, a simulation-based multi-level planning methodology is presented, which enables the holistic planning of geothermal heat pump systems with borehole heat exchangers on the scales of single buildings up to district level in the early planning phases. By integrating calculation tools for mapping the upper ground and subsurface into a closed simulation chain, existing transfer gaps between different trades can be closed.

Using a prototypically implemented system configurator, geothermal heat pump systems can be designed in detail, compared with conventional systems, and evaluated on the basis of technical, energetic, economic, and ecological criteria. The combination of configuration, immediate result plotting and automatically triggered simulations running in the background enables an iterative and practical design process. In this context, a heat pump system model is presented which is adapted to the functionalities of the system configurator and specialized for the early planning process. This model includes thermal storage balances and control algorithms, is applicable on city district level and can be coupled bidirectionally to subsurface models.

The tool chain's connection to an existing web- and GIS-based geoportal including databases enables a central data aggregation and geothermal site evaluations. This can provide tool-based support for the application and approval process of shallow geothermal systems and holistic planning approaches such as municipal heat planning.

Vorwort und Dank

Heutzutage bedrohen mehrere Katastrophen den Planeten und die Zukunft der Menschheit. Neben dem dramatischen Wald- und Artensterben sowie dem Raubbau an der Natur und Umwelt, steigt die mittlere globale Oberflächentemperatur unverhältnismäßig stark an. Der anthropogene Klimawandel verursacht die Häufung von Extremwetterereignissen sowie von ökologischen und humanitären Katastrophen, die einen Wandel in den globalen und unseren lokalen Strukturen notwendig machen. Zudem können durch ein Überschreiten von Klimakipppunkten unvorhersehbare und unumkehrbare Folgen angestoßen werden. Um zunehmende und durch den Klimawandel induzierte Extremwetterereignisse und Umweltkatastrophen abzumildern sowie Deutschland von der Abhängigkeit von Rohstoff- und Energieimporten zu lösen, müssen alle Sektoren so schnell wie möglich Treibhausgasneutralität erreichen.

Auch in Deutschland treten vermehrt Extremwetterereignisse wie z. B. Starkregenfälle, Überschwemmungen sowie Hitze- und Dürreperioden auf. Mehrere wissenschaftliche Studien zeigen auf, dass Industrienationen wie Deutschland schon 2030 bis 2035 treibhausgasneutral sein müssen, um die globale Temperatur auf 1,5 °C zu begrenzen und die weltweiten Klimaziele einzuhalten. Neben der Abschaffung von Subventionen für fossile Energieträger wie Kohle, Gas und Öl, müssen erneuerbare Energietechnologien massiv ausgebaut, der Energiebedarf reduziert und Investitionen in fossile Technologien verhindert werden.

Die Trägheit des Gebäudesektors impliziert ein akutes Handeln in diesem Bereich. Zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors stellt die Wärmepumpe eine Schlüsseltechnologie dar. Trotz kontinuierlicher Absatzsteigerungen müssen Wärmepumpen deutlich stärker verbreitet werden, um die Ziele im Gebäudesektor zu erreichen. Diesbezüglich muss der zusätzliche Strombedarf zukünftig installierter Wärmepumpen oder neuer Elektrofahrzeuge kompensiert werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Unterstützung des Planungsprozesses geothermischer Wärmepumpensysteme durch den Einsatz eines simulationsbasierten Mehrebenen-Planungswerkzeugs. Ich hoffe mit dieser Arbeit einen kleinen Beitrag zu leisten, um den Ausbau regenerativer Energiequellen in Form der oberflächennahen Geothermie und damit die Dekarbonisierung des Gebäudesektors voranzubringen.

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, als Leiter und stv. Leiter der Gruppe Energie in Gebäuden und Quartieren (EBD) sowie als Koordinator der Werkzeugkettenentwicklung von EBD am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D) an der RWTH Aachen University angefertigt. Ein großer Dank geht an meinen Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck für sein Vertrauen und seine Unterstützung während der Umsetzung dieser Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff als Zweitgutachter der vorliegenden Arbeit für die Betreuung der Arbeit und dessen umfangreichen fachlichen Input bedanken. Zudem bedanke ich mich herzlich bei allen Korrekturlesern der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus gilt den von mir betreuten wissenschaftlichen Hilfskräften sowie Bachelor- und Masteranden Dank für deren

Arbeit und deren Beiträge für die vorliegende Arbeit. An dieser Stelle möchte ich insbesondere die Abschlussarbeiten von Tobias Böth, Doreen Eyhusen, Mira Löhmer und Hendrik van Kempen sowie die HiWi-Tätigkeit von Tobias Böth, Doreen Eyhusen und Tim Neutzler hervorheben. Bei meinen ehemaligen und gegenwärtigen Arbeitskollegen des Lehrstuhls bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit in einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre. Insbesondere möchte ich mich bei meiner Frau Petra Ponten für die bedingungslose Unterstützung während meiner Zeit als Doktorand bedanken. Schließlich bedanke ich mich bei meinen zwei Töchtern Leni und Maya für die Möglichkeit mich von dem Job und der Dissertation abzulenken und mich geistig zu erholen.

Um eine schnelle und angenehme Lesbarkeit des Textes zu gewährleisten, wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine genderkonforme Schreibweise verzichtet. Ich bitte den Leser hierfür um Verständnis.

Lenggries, September 2023

Sebastian Weck-Ponten

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur **XII**

Abbildungsverzeichnis **XVII**

Tabellenverzeichnis **XX**

1. Einleitung **1**
1.1. Motivation . . . 1
1.2. Problemstellung . . . 4
1.3. Forschungshypothesen . . . 8
1.4. Übergeordnete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit . . . 9
1.5. Abgrenzung . . . 10
1.6. Struktureller Aufbau der Arbeit . . . 12

2. Planung geothermischer Wärmepumpensysteme **13**
2.1. Grundlagen der oberflächennahen Geothermie . . . 13
2.2. Geothermische Nutzung über Wärmepumpen . . . 18
2.3. Geothermisches Potenzial . . . 25
2.4. Leistungsphasen der Planung oberflächennaher Geothermieanlagen . . . 26
2.5. Planungsrelevante Informationen . . . 31
2.5.1. Gebäudekennwerte . . . 32
2.5.2. Wärmepumpe . . . 33
2.5.3. Trinkwassergüte . . . 37
2.5.4. Heizwärmeübergabesystem . . . 38
2.5.5. Thermische Speicher . . . 39
2.5.6. Weitere standortabhängige Parameter . . . 39
2.5.7. Geothermische Quellenanlagen und das Erdreich . . . 40
2.5.8. Antrags- und Genehmigungsprozess . . . 43
2.5.9. Übergreifende Systemzusammenhänge . . . 50
2.6. Kommunale Wärmeplanung . . . 55
2.7. Modellierung in der oberflächennahen Geothermie . . . 56
2.8. Bestehende Planungswerkzeuge . . . 59
2.8.1. Gebäude-, Quartiers- und Anlagensimulation . . . 60
2.8.2. Berechnungswerkzeuge für Erdwärmesonden . . . 62
2.8.3. Wärmepumpenmodelle . . . 68
2.8.4. Konfiguratoren für Wärmepumpensysteme . . . 72
2.8.5. Planungsprozesse und Werkzeugketten . . . 77

3. Mehrebenen-Planungsansatz **80**
3.1. Anforderungen, Einsatzbereich und Zielgruppen . . . 81
3.2. Softwarekonzept und Planungsablauf . . . 83
3.3. Gebäudeberechnungswerkzeuge . . . 88
3.4. Wärmepumpensystemmodell . . . 90
3.4.1. Einsatzbereich und Anforderungen . . . 91
3.4.2. Funktionsschema und Eingangsparameter . . . 93
3.4.3. Modell- und Implementierungsstruktur . . . 95
3.4.4. Beschreibung des Berechnungskerns und der Regelungsalgorithmen . 98
3.4.5. Simulationsergebnisse . . . 113
3.4.6. Schnittstelle zu Untergrund- und Wärmenetzmodellen . . . 118
3.5. Systemkonfigurator . . . 120
3.5.1. Einsatzbereiche, Zielgruppen und Anforderungen . . . 120
3.5.2. GeoWPSys+Web . . . 123
3.5.3. Erweiterte Funktionalitäten von GeoWPSys+ . . . 141

4. Demonstration **150**

5. Schlussbetrachtung **160**
5.1. Zusammenfassung . . . 160
5.2. Diskussion und Ausblick . . . 161

Literaturverzeichnis **166**

Anhang **195**

A. Stand der Technik **195**

B. Gebäudeberechnungen **197**

C. Wärmepumpenmodell **200**
C.1. Eingangsparameter . . . 200
C.2. Modus . . . 204
C.3. Vollladung und Sperrzeit . . . 206
C.4. Interpolation . . . 210
C.5. Logik, Ein- und Ausgabeparameter der Regelungsalgorithmen . . . 210
C.6. Bilanz um den Wärmepumpenverdampfer . . . 222
C.7. Direkte Geothermische Kühlung . . . 222
C.8. Speicherbilanz . . . 223
C.9. Simulationsergebnisse . . . 224
C.10. Randbedingungen der Ergebnisdiagramme . . . 226
C.10.1. XML-Struktur . . . 226

D. GeoWPSys+Web **235**
D.1. Dateneingabe . . . 235

D.2. Komponenten-XML 240
D.3. Zusätzliche Informationen der Systemvergleiche 246
D.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse 247
D.5. Prozentuale Aufteilung der Darstellung im Netzdiagramm 249
D.6. Wärmepumpensimulation 251
D.7. Quellendimensionierung 251

E. Zusätzliche Funktionen von GeoWPSys+ 252

F. Demonstration 253
F.1. XML-Datei des Fallbeispiels 253
F.2. Konfigurationsrandbedingungen 280

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c	Spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
D	Deckungsanteil	%
E	Energie	J
f	Prozentualer Faktor	%
i	Kalkulationszins	%
I	Investition	€
j	Preisänderung	%
K	Kapitalwert	€
l	Länge	m
n	Anzahl (u. a. der Erdwärmesonden)	–
P	Leistung	W
$\dot{q}$	Spezifische Entzugsleistung einer Erdwärmesonde	W/m
Q	Energiemenge	J
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
S	Skalenwert des Netzdiagramms	–
t	Zeitpunkt	s
T	Temperatur	K
U	Innere Energie	J
V	Volumen	m^3
$\dot{V}$	Volumenstrom	m^3/s
W	Arbeit	J
y	Anteil der Trinkwassererwärmung am gesamten Wärmebedarf	–
z	Zahlungsstrom	€

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Deckungsanteil an der Raumheizung und Trinkwassererwärmung im monoenergetischen Betrieb der Wärmepumpe	–
Δ	Differenz	–
ϵ	Leistungszahl	–
η_s	Jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz	%
ϱ	Dichte	kg/m^3

Indizes

Abkürzung	Bedeutung
aus	Austretend
biv	Bivalent
B0/W35	Brine 0 °C / Water 35 °C = Sole mit 0 °C und Wasser mit 35 °C
Boden	Boden
c	Carnot
cool	Kühlung (englisch: cooling)
d	Tag
dt	Zeitschritt
DHW	Trinkwarmwasser (englisch: Domestic hot water)
$\Delta\vartheta$	Abweichende Temperaturdifferenzen bei Messung und Betrieb am Kondensator der Wärmepumpe
end	Ende
ein	Eintretend
el	Elektrisch
erf	Erforderlich
EE	Erneuerbare Energien
Estrich	Estrich
EWS	Erdwärmesonde
foss	Fossil
FBH	Fußbodenheizung
H	Heizung
HG	Heizgrenze
HL	Normheizlast

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abkürzung	**Bedeutung**
HS	Heizstab
in	Eingehend (englisch: in)
K	Kühlung
krit	Kritisch
KW	Kaltwasser
Laufzeit	Laufzeitoptimierung
max	Maximal
min	Minimal
NA	Normaußen
Nenn	Nennbetriebsbedingung
Nutz	Nutzbar
out	Ausgehend (englisch: out)
P	Wärmequellenpumpe
Puffer	Pufferspeicher
Quelle	Quelle
secHeatGen	2. Wärmeerzeuger (englisch: second heat generator)
Senke	Senke
soil	Boden (englisch: soil)
Sole	Sole
Sonst	Sonstiges
Sp	Speicher
Sperr	Sperrzeit
SP	Solepumpe
St	Speicher (englisch: Storage)
t	Zeit
TRY	Test Reference Year
TWW	Trinkwarmwasser
ϑ	Unterschiede zwischen Messung und Betrieb / Unterschiedliche Betriebsbedingungen der Wärmepumpe
V	Verlust
Verd	Verdampfer
VK	Verbraucherkreis
VL	Vorlauf
Vorschlag	Vorschlag
w	Wasser
WP	Wärmepumpe
WPA	Wärmepumpenanlage
Zelle	Zelle
2.WE	Zweiter Wärmeerzeuger

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A	Abschaltpunkt
AM	Amortisation
AHO	Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e.V.
API	Programmierschnittstelle (englisch: Application Programming Interface)
B	Bivalenzpunkt
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBergG	Bundesberggesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BHKW	Blockheizkraftwerk
BT	Bohrtiefe der Erdwärmesonden
B0/W35	Brine 0 °C / Water 35 °C = Sole mit 0 °C und Wasser mit 35 °C
C	Gebäudelast bei Abschaltung im bivalent-teilparallelem Betrieb
COP	Coefficient of Performance
COP*	Leistungszahl während des Wärmepumpenbetriebs bzw. innerhalb der Simulation
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EE	Erneuerbare Energien
EER	Energy Efficiency Ratio
EN	Europäische Norm
ES	Einzelsonde
EWK	Erdwärmekollektor
EWS	Erdwärmesonden
GA	Gleichungsanpassung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GeolDG	Geologiedatengesetz
GeTIS	Geothermisches Informationssystem
GIS	Geographisches Informationssystem
GUI	Grafische Nutzeroberfläche (englisch: Graphical user interface)
HG	Heizgrenze
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
Hyst.	Hysterese
HZA	Heizstabanteil

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abkürzung	**Bedeutung**
IEA	Internationale Energieagentur
JAZ	Jahresarbeitszahl
KM	Kennlinienmodell
Konf.	Konfigurator
KW	Kaltwasser
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
PE	Primärenergie
PV	Photovoltaik
RB	Randbedingung
REST	Representational State Transfer
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
SCOP	Seasonal coefficient of performance
SS	Schrägsonde
StandAG	Standortauswahlgesetz
SUWP	Soleumwälzpumpe
TBA	Technische Baugrundausstattung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgas
TRT	Thermal Response Test
TRY	Testreferenzjahre (englisch: Test Reference Year)
TWE	Trinkwassererwärmung
TWW	Trinkwarmwasser
UG	Untergrund
URL	Uniform Resource Locator
UWP	Umwälzpumpe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WE	Wärmeerzeuger
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WP	Wärmepumpe
WPA	Wärmepumpenanlage
WPHA	Wärmepumpenheizungsanlage
WQA	Wärmequellenanlage
2.WE	Zweiter Wärmeerzeuger

Abbildungsverzeichnis

1.1. Planerische Bilanzgrenze der vorliegenden Arbeit 10
1.2. Systemische Bilanzgrenze der Werkzeuge 11

2.1. Jahreszeitlicher Temperaturverlauf im Untergrund 14
2.2. Einbindung der oberflächennahen Geothermie in Energiesysteme 15
2.3. Schaltschema und Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe 18
2.4. Verlauf der Carnot-Leistungszahl 19
2.5. Exemplarische Wärmepumpenheizleistungskennlinien 21
2.6. Exemplarische Kennlinien der elektrischen Leistungsaufnahme 21
2.7. Bilanzgrenzen einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage 22
2.8. Dimensionierungsdiagramm der bivalent-parallelen Betriebsweise 35
2.9. Dimensionierungsdiagramm der bivalent-alternativen Betriebsweise 36
2.10. Dimensionierungsdiagramm der bivalent-teilparallelen Betriebsweise 36
2.11. Beispielhafte geordnete Jahresdauerlinie für Heizung und TWW 37
2.12. Temperaturfahnen im Untergrund 49
2.13. Dimensionierungsparameter geothermischer Wärmepumpensysteme 50
2.14. THG-Emissionen von Wärmepumpen über die JAZ 53
2.15. Planungskomplexität und Einbindung erneuerbarer Energien 54
2.16. Modellierung in der oberflächennahen Geothermie 57
2.17. Zeitliche und räumliche Verortung von Planungswerkzeugen 58
2.18. Einordnung der Wärmepumpenmodelltypen 70

3.1. Applikationen innerhalb von PlanGeoWP 80
3.2. Softwarestruktur von PlanGeoWP 83
3.3. Planungsablauf in PlanGeoWP 87
3.4. Gebäudeberechnungsprozesse 89
3.5. Funktionsschema des Wärmepumpensystemmodells 93
3.6. Implementierungsstruktur von ModHPS 95
3.7. Zuordnung: Wärmepumpen, Gebäude und Erdwärmesonden 96
3.8. Zuordnung der Wärmepumpenregelung 97
3.9. Struktur des Berechnungskerns (*calculate*-Funktion) 99
3.10. Struktur der Funktion *modeControl* 100
3.11. Überprüfung der Sperrzeiten 101
3.12. Grenzrandbedingungen für Speicher 102
3.13. Wärmepumpenheizleistungskennlinien Kaskade 104
3.14. Regelungsansatz für die monovalente Betriebsweise 106
3.15. Regelungsstruktur für die *HPonControl*-Funktion 107
3.16. Speicherbilanzen mit ein- und austretenden Wärmeströmen 111

3.17. Wärmequellenaustrittstemperaturen und Leistungszahlen 115
3.18. Temperatur- und Leistungsbedarfe (Jahr) 116
3.19. Temperatur- und Leistungsbedarfe (Tag) 117
3.20. Temperatur- und Leistungsbedarfe (Stunden) 117
3.21. Kopplung von ModHPS an ein Untergrundmodell 119
3.22. Client-Server-Architektur von GeoWPSys+Web 124
3.23. Sessionablauf von GeoWPSys+Web 125
3.24. Hauptansicht von GeoWPSys+Web 127
3.25. Ergebnisübersicht von GeoWPSys+Web 131
3.26. Dimensionierungsdiagramm von GeoWPSys+Web 133
3.27. Wirtschaftlichkeitsdiagramm von GeoWPSys+Web 135
3.28. THG-Emissionsdiagramm in GeoWPSys+Web 137
3.29. Netzdiagramm der Bewertungsparameter 138
3.30. Komponentenauswahlfenster 139
3.31. Hauptansicht von GeoWPSys+ 143
3.32. Pufferspeicherdimensionierung 144
3.33. Quartiersansicht von GeoWPSys+ 148

4.1. Gebäude und Sonden im Beispielquartier 150
4.2. Ausgewählte Ergebnisse für *HP05* 155
4.3. Ergebnisse der gekoppelten Simulation für die Sonden des Gebäudes *655122* 159

B.1. Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 1) 197
B.2. Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 2) – Heizleistungskurve 198
B.3. Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 2) – Jahresdauerlinie 198
B.4. Gegenüberstellung der Heizwärmelastkurven 199

C.1. Eingangsdaten und Ergebnisse von *modeControl* 204
C.2. Modus-Regelungsstruktur bei alleinigem TWW-Speicher 204
C.3. Fortführung der *modeControl*-Funktion 205
C.4. Eingangsdaten und Ergebnisse der Speichervollladungsfunktionen 206
C.5. *HPControlLoadStorageFull()* 206
C.6. Regelungsstruktur der *LoadStorageFull*-Funktion 207
C.7. Regelungsstruktur der Speichervollladung (teilparallel und alternativ) 208
C.8. Eingangsdaten und Ergebnisse von *blockingHP* 208
C.9. Regelungsstruktur *secHeatGenLoadStorageFull*-Funktion 209
C.10. Eingangsdaten und Ergebnisse von *InterpolationHP* 210
C.11. Eingangsdaten und Ergebnisse der monovalenten Regelungsstrategie 210
C.12. Eingangsdaten und Ergebnisse von *HPonControl* 211
C.13. Eingangsdaten und Ergebnisse der parallelen Regelungsstrategie 211
C.14. Regelungsstruktur der parallelen Betriebsweise im Heizungsmodus 212
C.15. Regelungsstruktur der parallelen Betriebsweise für den TWW-Modus 213
C.16. Eingangsdaten und Ergebnisse der alternativen Regelungsstrategie 214
C.17. Eingangsdaten und Ergebnisse der teil-parallelen Regelungsstrategie 214
C.18. Regelungsstruktur der alternativen Betriebsweise 215
C.19. Fortführung der Regelungsstruktur der alternativen Betriebsweise 216

C.20. Alternative Regelungsstruktur im TWW-Modus 217
C.21. Regelungsstruktur der teil-parallelen Betriebsweise 218
C.22. Fortführung der Regelungsstruktur der teil-parallelen Betriebsweise 219
C.23. Teil-parallele Regelungsstruktur im TWW-Modus 220
C.24. Regelungsstruktur von *secHeatGenOnControl* 221
C.25. Eingangsdaten und Ergebnisse von *QsoilTsoilinCOP* 222
C.26. Eingangsdaten und Ergebnisse von *cooling* 222
C.27. Eingangsdaten und Ergebnisse der Speicherbilanzen 223

D.1. Screenshot der zusätzlichen Informationen von GeoWPSys+Web 246
D.2. Screenshot der Strompreistabelle 247
D.3. Screenshot der CO_2-Preistabelle 248
D.4. Wärmepumpensimulationsfenster 251
D.5. Erdwärmesondenlänge 251

E.1. Sperrzeiten- und TWW-Zapfprofilfenster in GeoWPSys+ 252

F.1. Konfigurationsrandbedingungen 1 280
F.2. Konfigurationsrandbedingungen 2 281
F.3. Konfigurationsrandbedingungen 3 281
F.4. Konfigurationsrandbedingungen 4 282
F.5. Konfigurationsrandbedingungen 5 283
F.6. Konfigurationsrandbedingungen 6 284
F.7. Konfigurationsergebnisse 285
F.8. Simulationsergebnisse von ModHPS für die *WPC* 04 287

Tabellenverzeichnis

2.1. Abstandsempfehlungen der Bundesländer 47
2.2. Gebäude- und Anlagensimulationsprogramme 60
2.3. Erdwärmesondenmodelle 63
2.4. Wärmepumpenmodelle aus der Literatur 71
2.5. Wärmepumpenkonfiguratoren 74
2.6. Simulationsbasierte Planungsprozesse und Werkzeugketten 78

4.1. Randbedingungen der Wärmepumpendimensionierung im Fallbeispiel 151
4.2. Randbedingungen der monovalenten Wärmepumpensystemempfehlung . . . 152
4.3. Wirtschaftlichste und ökologischste Systemvarianten 153
4.4. Konfigurationsunterschiede für *HP05* 154
4.5. Simulationsergebnisse von *HP05* 156

A.1. Randbedingungen zu Abstandsempfehlungen der Bundesländer 196

C.1. Notwendige Eingangsparameter von ModHPS 201
C.2. Notwendige Eingangsparameter von ModHPS inklusive Beschreibungen . . . 202
C.3. Weitere Eingangsparameter von ModHPS 203
C.4. Ergebnisparameter von ModHPS nach kompletter Simulationsdauer 224
C.5. ModHPS-Ergebnisparameter des ersten und letzten Betriebsjahres 225

D.1. Gebäude- und Haustechnikparameter 235
D.2. Energiebedarfsparameter 236
D.3. Simulationsfensterparameter TEASER 237
D.4. Simulationsfensterparameter SCoTED 238
D.5. Heizungssystemparameter 238
D.6. Quellensystemparameter 239
D.7. Wirtschaftlichkeitsparameter 239
D.8. Ökologische Parameter 240
D.9. Netzdiagramm: Aufteilung Amortisation 249
D.10. Netzdiagramm: Aufteilung Platzbedarf 250

F.1. Investitionskostenvergleich des Fallbeispiels 286

1. Einleitung

1.1. Motivation

Durch den anthropogenen Klimawandel steigt die mittlere globale Oberflächentemperatur unverhältnismäßig stark an. Daraus folgen Extremwetterereignisse sowie ökologische und humanitäre Katastrophen, die einen Wandel in unseren globalen und auch lokalen Strukturen notwendig machen. Die globale Erwärmung ist proportional zur gesamten Menge an Kohlenstoffdioxid (CO_2) in der Atmosphäre [Rogelj et al., 2019]. Somit ist der Ausstoß von klimawirksamen Gasen wie z. B. CO_2 oder Methan schnellstmöglich zu reduzieren. Die Begrenzung der Erderwärmung erfordert ein akutes Gegensteuern in Form einer weltweiten und sektorübergreifenden Dekarbonisierung bis hin zur Treibhausgasneutralität.

Auf der 21. UN-Klimakonferenz 2015 in Paris wurde eine internationale Klimaschutzvereinbarung als Nachfolge des Kyoto-Protokolls verabschiedet. Erstmalig wurde von allen beteiligten Staaten ein Ziel für die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C und möglichst 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau formuliert [BMWK, 2022]. Mittlerweile besteht ein weltweiter Konsens darüber, dass nur noch ein begrenztes Budget zur Emission von Treibhausgasen (THG) verbleibt und ein schnellstmögliches Handeln erforderlich ist [Rogelj et al., 2019].

Zur Begrenzung anthropogener, energiebedingter THG-Emissionen sind Maßnahmen in allen Sektoren erforderlich. In Deutschland spielt der Gebäudesektor eine zentrale Rolle. Nach Berechnungen und Gebäudemodellierungen der *dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität* [dena, 2021] werden in Deutschland rund 35 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs für Gebäude genutzt. Durch die Nutzung und den Betrieb von Gebäuden entfallen nach dem Verursacherprinzip rund 30 Prozent der THG-Emissionen auf den Gebäudebereich [dena, 2021].[1] Trotz einer Emissionsminderung um 5,3 Prozent im Vergleich zum Jahr 2021, wurde die zulässige Jahresemissionsmenge in 2022 gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz im Gebäudesektor erneut verfehlt [Umweltbundesamt, 2023b].

Lange Investitionszyklen und geringe Transformationsraten implizieren im Gebäudebereich einen schnellen Handlungsbedarf mit vorausschauenden Maßnahmen. Die Trägheit des Gebäudesektors wird durch die seit Jahren gleichbleibend niedrige Sanierungsrate von etwa

[1] Bei der Bilanzierung nach dem Quellprinzip, bei dem die Emissionen des Stroms und der Fernwärmenetze nicht dem Gebäudesektor zugeordnet werden, sind es nach dena [2021] lediglich 14 Prozent.

einem Prozent[2] deutlich [dena, 2021]. Die geringe Sanierungsrate steht auch einem flächendeckenden Austausch bestehender fossiler Heizungssysteme entgegen.

Die Heizungsanlagen in deutschen Wohnungen sind nach Hochrechnungen des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) durchschnittlich 17 Jahre alt [BDEW, 2019]. Etwa 24 Prozent der Heizungsanlagen sind sogar über 25 Jahre und knapp 40 Prozent über 20 Jahre im Betrieb [BDEW, 2019]. Nur rund 35 Prozent der Heizungsanlagen in deutschen Wohnungen sind seit weniger als zehn Jahren in Betrieb [BDEW, 2019]. Die meisten der bestehenden Anlagen erreichen aufgrund ihres älteren technischen Stands sowie aufgrund von Alterungserscheinungen nicht das geforderte Effizienzniveau [BDEW, 2019].

Zur Dekarbonisierung des äußerst heterogenen Gebäudesektors benötigt Deutschland, neben der Steigerung der Sanierungsrate und -tiefe sowie dem Austausch ineffizienter Heizungsanlagen, einen umfassenden Ausbau regenerativer Energieerzeuger sowie eine Diversität im erneuerbaren Energieportfolio.

In Deutschland wurde in den vergangenen Jahren für die Bereitstellung erneuerbarer Energien vermehrt der Stromsektor in den Fokus genommen. Im Stromsektor lag der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Jahr 2022 bei 46,2 Prozent [Umweltbundesamt, 2023a]. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte betrug im Jahr 2022 lediglich 17,4 Prozent [Umweltbundesamt, 2023a].

Mögliche regenerative Energietechnologien für die Transformation des Wärmesektors sind im Wesentlichen Solarthermieanlagen, Wärmepumpen und tiefe geothermische Systeme. Sonstige Technologien wie z. B. biomassebetriebene Festbrennstoffkessel oder Biomassevergärungsanlagen können aufgrund des begrenzten Ausbaupotenzials nur partiell eingesetzt werden. Solarthermieanlagen sind in Deutschland aufgrund der Volatilität der Solarstrahlung und der jahreszeitlichen Diskrepanz zwischen Heizwärmebedarf und Solarstrahlungsangebot i. d. R. nicht für eine ganzjährige Bereitstellung der Wärmegrundlast geeignet [LEA, 2022]. Zusätzlich beschränkt die Flächenkonkurrenz zu Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) den Einsatz von solarthermischen Systemen.

Aufgrund des für den Betrieb notwendigen Stromeinsatzes kann die Wärmepumpe grundsätzlich nur dann eine treibhausgasneutrale Technologie sein, wenn der Strombedarf der Wärmepumpe vollständig aus regenerativen Quellen bereitgestellt wird. Das impliziert den kombinierten Einsatz mit erneuerbaren und dezentralen Stromerzeugungstechnologien wie z. B. PV-Anlagen. Durch das physikalische Prinzip elektrisch angetriebener Wärmepumpen sind sie zudem für den Einsatz als Sektorkopplungstechnologie in den Bereichen Strom und Wärme prädestiniert. Darüber hinaus zeichnen sich Wärmepumpen durch einen sehr flexiblen Einsatz bezüglich der angeschlossenen Wärmequellen sowie der primär- und sekundärseitigen Temperaturen aus. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten zur Bereitstellung von Wärme oder Kälte.

[2] Bezogen auf Vollsanierungsäquivalente.

In einem zunehmend elektrifizierten Gebäudesektor stellt die Wärmepumpe eine Schlüsseltechnologie dar. Zahlreiche Studien prognostizieren, dass Wärmepumpen ein fester Bestandteil der zukünftigen Energieversorgung im Gebäudesektor sein werden (siehe u. a. [Agora, 2021; Brandes et al., 2020; Bründlinger et al., 2018; dena, 2021; Dittrich et al., 2020; Fraunhofer IWES/IBP, 2017; Prognos et al., 2020, 2021; Sterchele et al., 2020]). Verschiedene Szenarien in unterschiedlichen Studien geben einen Bedarf von ca. drei bis acht Millionen Wärmepumpen bis 2030 sowie rund sieben bis knapp 18 Millionen Wärmepumpen bis 2050 an (siehe u. a. [Agora, 2021; Backhaus et al., 2021; Brandes et al., 2020; Bründlinger et al., 2018; BWP, 2021; Dittrich et al., 2020; Fraunhofer IWES/IBP, 2017; Prognos et al., 2020; Repenning et al., 2023]). Aktuelle Studien prognostizieren für 2045 neun bis 14 Millionen Wärmepumpenanlagen [dena, 2021; Prognos et al., 2021]. In Thomas et al. [2022] wird geschätzt, dass bis zum Jahr 2035 sogar zwölf Millionen Wärmepumpen benötigt werden, um die Wärmeversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen.

Im Jahr 2022 waren mit rund 1,45 Millionen Wärmepumpengeräten [Backhaus et al., 2023] jedoch nur in etwa drei Prozent der deutschen Bestandswohngebäude elektrisch betriebene Wärmepumpen installiert [BDEW, 2023]. Rund 29 Prozent (405.000 Stück) der Heizungswärmepumpen wurden 2022 geothermisch betrieben [Backhaus et al., 2023]. Im Jahr 2022 wurden in Deutschland 281.500 Wärmepumpen verkauft [Backhaus et al., 2023]. Der Absatz von Heizungswärmepumpen (236.000 Stück) stieg 2022 im Vergleich zum Vorjahr um 53 Prozent [BWP, 2023]. Der Absatz von Erdreichwärmepumpen[3] stieg lediglich um 14 Prozent auf 31.000 Stück [BWP, 2023] und nahm mit knapp 13 Prozent der Heizungswärmepumpen im Vergleich zu Luft-Wasser-Wärmepumpen (87 Prozent) eine untergeordnete Rolle ein [Backhaus et al., 2023]. Nach Dittrich et al. [2020] wird eine deutliche Steigerung des Anteils von erdgekoppelten Anlagen an den neu installierten Wärmepumpen angenommen (57 Prozent in 2030 und 80 Prozent in 2050).

Mit einem konstanten jährlichen Zubau von 281.500 Wärmepumpen wären auf der Grundlage der vorgenannten Zahlen im Jahr 2030 ca. 3,7 Mio. und im Jahr 2045 ca. 7,9 Mio. Wärmepumpen installiert. Somit könnte durch das starke Wachstum des Heizungswärmepumpenabsatzes in 2022 die untere Grenze des prognostizierten Wärmepumpenbedarfs für das Jahr 2030 erreicht werden. Trotzdem reichen die aktuellen Verkaufs- und Installationszahlen nicht aus, um den prognostizierten Bedarf an Wärmepumpensystemen für 2045 zu decken. Zur Steigerung der Installationszahlen müssen, neben der Erhöhung der Produktionskapazitäten der Wärmepumpenhersteller sowie der personellen Kapazitäten bei Planern

[3] Als Wärmequellen für Wärmepumpen können u. a. die Umgebungsluft, das Erdreich, Oberflächengewässer, das Grundwasser, örtliches Abwasser oder Abwärme aus industriellen Prozessen genutzt werden. Die Benennung der Wärmepumpen erfolgt anhand der eingesetzten Fluide auf der Primär- und Sekundärseite. Unterschieden wird u. a. zwischen Sole-Wasser-, Wasser-Wasser-, Luft-Wasser-, Wasser-Luft- oder Sole-Luft-Wärmepumpen. Dabei steht der erstgenannte Begriff für die Art des Wärmeträgerfluids der Wärmequelle und der zweite für das Fluid der Wärmesenke. Der Begriff Erdreichwärmepumpe wird für die Darstellung von Absatzzahlen häufig verwendet und meint (im Gegensatz zu Luft-Wasser-Wärmpumpen) die Wärmepumpen, die mit dem Erdreich, Grundwasser oder sonstigen Wärmequellen betrieben werden. Erdreichwärmepumpen werden im Folgenden auch als geothermische Wärmepumpen bezeichnet.

und Handwerkern, die verfügbaren Wärmequellen für Wärmepumpen standortspezifisch analysiert und möglichst effizient genutzt werden.

Der oberflächennahen Geothermie kommt als Wärmequelle durch die Einsetzbarkeit sowohl für die Gebäudebeheizung und Trinkwassererwärmung (TWE) als auch zur Gebäudekühlung eine besondere Bedeutung zu. Die oberflächennahe Geothermie umfasst die thermische Nutzung des Erdreichs und des Grundwassers und steht als erneuerbare, regionale und grundlastfähige Energiequelle nahezu unbegrenzt und unabhängig von Wetterbedingungen und Energieträgerimporten zur Verfügung. Geothermische Wärmepumpen sind in Deutschland über die Jahresbilanz effizienter als Luft-Wasser-Wärmepumpen (vergleiche u. a. [Günther et al., 2014, 2020; Miara et al., 2011]), weisen eine geringere Thermosensibilität auf und erzeugen dadurch geringere Lastspitzen bei tiefen Außenlufttemperaturen. Zukünftig kann die oberflächennahe Geothermie eine zentrale Rolle in der Wärmewende und Dekarbonisierung des Gebäudesektors einnehmen.

1.2. Problemstellung

Aktuell nehmen die oberflächennahe Geothermie und die Umweltwärme mit insgesamt knapp elf Prozent nur eine untergeordnete Rolle an der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energien im Wärmesektor ein [Umweltbundesamt, 2023a]. Die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme[4] weist einige Herausforderungen und bislang ungenutzte Optimierungspotenziale auf, die einem flächendeckenden Einsatz geothermischer Wärmepumpensysteme und der schnellstmöglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors entgegenstehen. Neben einem derzeitigen akuten Fachkräftemangel, sowohl im Sanitär- und Heizungshandwerk als auch in den Bereichen Brunnenbau bzw. Bohrarbeiten, sowie dem notwendigen Aufbau von Kompetenzen bezüglich der Umstellung von fossilen Wärmeerzeugern auf Wärmepumpensysteme [Born et al., 2022], lassen sich auch genehmigungsrechtliche, technische und planerische Herausforderungen identifizieren. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Grundwasserschutz, Geologie, Hydrologie, Heizungstechnik und Nachbarschaftsrecht besteht ein hoher Planungs- und Genehmigungsaufwand für geothermische Wärmepumpensysteme. Die vorliegende Arbeit thematisiert weniger den Fachkräftemangel sowie die Installation und Inbetriebnahme geothermischer Wärmepumpensysteme, sondern vielmehr Herausforderungen in der Planung samt deren komplexen Zusammenhängen und dynamischen Wechselwirkungen.

[4] In der vorliegenden Arbeit wird zwischen der Planung und Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme unterschieden. Die Dimensionierung meint dabei die Bestimmung der erforderlichen Wärmepumpennennleistung und ggf. die Nennleistung weiterer Wärmeerzeuger im Falle von bivalenten Anlagen. Darüber hinaus umfasst die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme u. a. die GIS-basierte Standortanalyse, die geothermische Potenzialermittlung am Standort, die Genehmigungsverfahren, die Auswahl des Wärmepumpengeräts und dessen Betriebsweise sowie Wirtschaftlichkeitsanalysen und ökologischen Bewertungen.

Die Wärmeerzeugerwahl bestimmt für einen langen Zeitraum u. a. den Energieträger, den Autarkiegrad und, im Zusammenspiel mit der Inbetriebnahme, Einstellung und Regelung sowie dem Nutzerverhalten, im Wesentlichen die THG-Emissionen und die Effizienz des Gesamtsystems der Wärmebereitstellung. Die frühe Planungsphase, in der Erzeugervarianten erstellt, diskutiert und verglichen werden, ist somit die Phase, in der fundamentale Entscheidungen getroffen werden. Infolgedessen werden innerhalb der vorliegenden Arbeit hauptsächlich die frühen Planungsphasen und darauf ausgerichtete Planungswerkzeuge betrachtet.

Einerseits erfordert die Planung geothermischer Systeme bereits in frühen Leistungsphasen eine Vielzahl an Informationen, die aus diversen Bezugsquellen aggregiert werden müssen. Dadurch entsteht den Planern ein erheblicher zeitlicher Aufwand. Neben geothermischen Standortrandbedingungen, wie z. B. geologische und hydrogeologische Daten, verfügbare Flächen und geothermische Restriktionen, werden städtebauliche Daten, Gebäudedaten, Systemkennzahlen und Kostenparameter benötigt.

Andererseits sind in frühen Planungsphasen und auf Quartiersebene i. d. R. wenige detaillierte Informationen über das bzw. die Gebäude, die technische Gebäudeausrüstung (TGA) und den Untergrund verfügbar. Oft beruhen Planungsentscheidungen von Erdwärmesondensystemen auf wenigen und teilweise ungenauen Daten aus öffentlichen Geoportalen oder vereinzelten Bohrungen in der Nähe des Projektstandorts. Meist werden nur bei größeren Projekten standortspezifische Untergrunddaten durch kostenintensive Probebohrungen und einen Thermal Response Test (TRT) ermittelt. Zudem gibt es in Deutschland länderübergreifend keine einheitliche Datengrundlage bezüglich der Quantität, Qualität und freien Verfügbarkeit von geologischen Daten [Bucher et al., 2018; Hein et al., 2016b]. Die heterogene und meist schlechte Datengrundlage sowie daraus resultierende Planungsunsicherheiten beeinflussen Entscheidungsträger bei der Auswahl des Energiesystems. Dadurch werden geothermische Konzepte innerhalb der Energiesystemplanung oft nicht berücksichtigt.

Eine weitere Herausforderung in der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme sind fachübergreifende Schnittstellen zwischen den Bereichen Gebäude, Anlagentechnik und Untergrund. In den verschiedenen Bereichen arbeiten unterschiedliche Akteure wie z. B. Ingenieurbüros und TGA-Planer, Architekten, Wärmepumpenhersteller, Haustechniker, Heizungsmonteure, geologische Fachplaner und Bohrfirmen. Gebäudeenergiebedarfsberechnungen und die Dimensionierung von Heizwärmeübergabesystemen, Wärmepumpen und Wärmequellenanlagen werden i. d. R. von unterschiedlichen Gewerken und aus verschiedenen Sichtweisen betrachtet (vgl. [Häfner et al., 2015; Koenigsdorff, 2011; VBI, 2012]). Einerseits stärkt die Beteiligung unterschiedlicher Gewerke an der Planung und Inbetriebnahme geothermischer Wärmepumpensysteme regionale Wertschöpfungsketten. Andererseits kann es vorkommen, dass dynamische Wechselwirkungen zwischen der Wärmequellenanlage, der Wärmepumpe und dem Gebäude durch die getrennte Dimensionierung und die dadurch getroffenen Vereinfachungen und Annahmen nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die daraus resultierenden Transferlücken, Fehlerquellen und Sicherheitszuschläge in den einzelnen Planungsbereichen können zu suboptimalen Systemdimensionierungen führen und dadurch die Investitionskosten, laufenden Kosten und THG-Emissionen der Anlage erhöhen.

Ein zentraler Planungsparameter, sowohl für die Dimensionierung der Wärmequellenanlage als auch für Systemvergleiche und die Entscheidungsfindung bezüglich des wirtschaftlichsten bzw. ökologischsten Energiesystems, ist die Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie hängt maßgeblich vom Anlagenbetrieb und von den primär- und sekundärseitigen Temperaturen in den einzelnen Betriebspunkten der Wärmepumpe ab. Wärmepumpen werden in Untergrundberechnungswerkzeugen für geothermische Quellenanlagen oft stark vereinfacht über eine vom Nutzer einzugebende und über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant angenommene JAZ abgebildet. Unterschiedliche Temperaturniveaus der Sekundärseite und daraus resultierende Schwankungen der Nutzwärmeleistung der Wärmepumpe, thermische Speicher, Regelungsmechanismen oder eine individuelle Systemkonstellation bleiben meist unberücksichtigt. Eine nutzerseitige Über- oder Unterschätzung der JAZ hat direkte Auswirkungen auf die Energiemengen und Wärmelasten, die dem Untergrund entzogen bzw. zugeführt werden. Dadurch werden wiederum die simulierten Temperaturen in den Sonden und die berechnete Sondenlänge sowie Wirtschaftlichkeitsanalysen und die THG-Emissionen beeinflusst. Für die Systemdimensionierung und -bewertung sollte die JAZ als zentraler Systemparameter bereits in der Vorplanung möglichst genau bestimmt werden. Dafür sind die dynamischen Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe und den Erdwärmesonden sowie das Gesamtsystemverhalten genauer abzubilden als in gängigen Planungswerkzeugen für Wärmequellenanlagen. Um Dynamiken zwischen Ober- und Untergrund in der Dimensionierung abbilden zu können, können bidirektional gekoppelte Wärmepumpen- und Untergrundsimulationen eingesetzt werden. So werden u. a. in Hein et al. [2016b] und Bucher et al. [2018] die Kopplung aus Untergrund- und Wärmepumpenmodellen zur Abbildung des dynamischen Einflusses der Wärmepumpe auf die aus dem Untergrund entzogene Last empfohlen.

Während Co-Simulationen in der Forschung Anwendung finden, kommen sie in der Praxis selten zum Einsatz. Gründe dafür sind u. a. die mangelnde Datenverfügbarkeit bezüglich der für die Simulationen benötigten gebäudetechnischen und hydrogeologischen Informationen, der erhöhte Rechenaufwand, die erforderliche Simulationsexpertise oder die dafür anfallenden zusätzlichen Kosten. Bei Anlagen im Einfamilienhausbereich werden aus Kostengründen häufig keine Fachplaner, sondern Bohrfirmen für die Planung beauftragt, welche die geothermische Anlage meist nur anhand vereinfachter Verfahren dimensionieren, ohne die Temperaturauswirkung des Anlagenbetriebs auf den Untergrund über mehrere Jahrzehnte zu simulieren. Insbesondere auf Quartiersebene und in den frühen Planungsphasen besteht sowohl ein Mangel an Simulationswerkzeugen, die dynamische Wechselwirkungen zwischen Ober- und Untergrund anhand von wenigen Eingangsparametern abbilden können, als auch der Bedarf Entscheidungsträger in den frühen Planungsprozess einzubinden. Nach Allegrini et al. [2015] sind für die ganzheitliche Analyse von Problemen auf Stadtteilebene sowohl Simulationsumgebungen mit gekoppelten, auf einen Teilbereich fokussierten, validierten und automatisiert ausführbaren Modellen notwendig, in denen die wichtigsten Merkmale des Anlagenbetriebs abstrahiert werden, als auch einfach zu bedienende Werkzeuge, die Entscheidungsträger bereits in einem frühen Stadium des Planungsprozesses auf Gebäude- und Stadtebene unterstützen können.

Eine weitere Herausforderung ist die nicht abgestimmte Planung von bestehenden und zu-

künftigen Erdwärmesonden sowie die daraus resultierende suboptimale und konkurrierende thermische Nutzung des Untergrunds [Fuchsluger et al., 2017]. Insbesondere mit einer zukünftigen Steigerung der Installationszahlen oberflächennaher geothermischer Anlagen und erhöhten flächenbezogenen Anlagendichten geht eine Zunahme der konkurrierenden Nutzung einher. Durch die Notwendigkeit, die gegenseitige thermische Beeinflussung der geothermischen Systeme sowie deren Auswirkungen auf Nachbargrundstücke und das Temperaturniveau des Bodens zu berücksichtigen, steigt die Planungskomplexität und der Bedarf an Berechnungsansätzen oder Simulationen, welche die horizontale Temperaturausbreitung im Untergrund abbilden und Auswirkungen zukünftig installierter thermischer Nutzer auf den Grundwasserkörper vorhersagen können [Epting u. Huggenberger, 2013]. Um den Genehmigungsaufwand zu reduzieren, werden in Deutschland thermische Auswirkungen auf Nachbargrundstücke sowie Wechselwirkungen geothermischer Anlagen untereinander über länderspezifische Abstandsempfehlungen erfasst. Nach Rumohr [2017], Poppei et al. [2017] und Bucher et al. [2018] können fixe Abstandsregeln eine thermische Beeinflussung nicht grundsätzlich verhindern bzw. ausreichend abbilden. Andererseits sind in manchen Fällen auch geringere Sondenabstände sinnvoll und möglich [Bucher et al., 2018; Hein et al., 2016b]. Darüber hinaus können sich thermische Beeinflussungen bei einer gegensätzlichen Verteilung von Heiz- und Kühllasten auch positiv auf Effekte wie z. B. die thermische Regeneration des Untergrunds auswirken (siehe u. a. [García-Gil et al., 2020; Perego et al., 2022]).

Die gegenseitige thermische Beeinflussung von Erdwärmesondenanlagen erzeugt planerische und rechtliche Problemstellungen, die insbesondere bei steigenden Installationszahlen geothermischer Wärmepumpensysteme zum Tragen kommen und in der Planung berücksichtigt werden müssen. Nach Koenigsdorff [2011] sollten in genehmigungsrechtlich zulässigen Arealen mit einer hohen Anzahl vorhandener oder geplanter geothermischer Systeme zukünftig geothermische Wärmelastpläne entwickelt und angewendet werden, die eine gezielte thermische Bewirtschaftung des Untergrunds gewährleisten. In der Vergangenheit wurden in vielen Städten lokale Energie- oder Klimaschutzpläne erarbeitet, die jedoch nur selten oberflächennahe geothermische Systeme beinhalteten [Zosseder et al., 2018] und eine ganzheitliche Planung unzureichend abbilden. Aufgrund dessen werden in der Forschungslandschaft aktuell die Herausforderungen bei der Einbindung oberflächennaher geothermischer Systeme innerhalb individueller regenerativer Wärmeversorgungslösungen auf kommunaler Ebene sowie die nachhaltige Nutzung des Untergrunds thematisiert [BVG, 2021]. Ein politisches Instrument für eine ganzheitliche Planung sind kommunale Wärmepläne, in denen strategische und umsetzungsorientierte Zielpfade für eine regenerative Wärmeversorgung erarbeitet werden.

1.3. Forschungshypothesen

Anhand der Problemstellung leiten sich folgende Forschungshypothesen für die vorliegende Arbeit ab:

(i) Es besteht die Notwendigkeit eines ganzheitlichen und simulationsbasierten Mehrebenen-Planungsansatzes für geothermische Wärmepumpensysteme, der standortspezifische Gegebenheiten wie Flächenverfügbarkeiten und Bodendaten, genehmigungsrelevante Restriktionen, dynamische Abhängigkeiten zwischen der Wärmequellen- und Heizungsanlage, thermische Wechselwirkungen im Untergrund und die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden berücksichtigt sowie die Abschätzung des geothermischen Energiepotenzials, eine nachhaltige geothermische Nutzung des Untergrunds und die Bewertung geothermischer Systeme unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Entscheidungsparameter ermöglicht.

(ii) In der Forschung und Praxis fehlen sowohl eine Methodik, den ganzheitlichen Planungsprozess bis auf Quartiersebene durchgängig digital abzubilden als auch die dafür notwendige, gewerke- und schnittstellenübergreifende Werkzeugkette.

(iii) Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Eingangsdaten und der Komplexität des Gesamtsystems bedarf es zusätzlich einer weitestgehend automatisierten Datenaggregation von öffentlich zugänglichen Daten und simulationsbasierten Prozessen, die Systemvergleiche auf der Grundlage technischer, energetischer, ökonomischer und klimarelevanter Entscheidungskriterien ermöglichen.

(iv) Um geothermische Wärmepumpensysteme schon in frühen Planungsphasen und auf Quartiersebene bedarfsgerecht dimensionieren und analysieren zu können, sind Simulationen mit kurzen Rechenzeiten notwendig, die möglichst wenig Simulationsexpertise und wenige Eingabeparameter benötigen.

1.4. Übergeordnete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

In Anbetracht der Herausforderungen und Forschungshypothesen werden die folgenden übergeordneten Ziele definiert:

(i) Detaillierte Aufbereitung des Stands der Technik und Wissenschaft in der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme sowie Ableitung des daraus resultierenden Forschungsbedarfs und Verbesserungspotenzials.

(ii) Entwicklung eines wissenschaftlichen und ganzheitlichen Ansatzes zur Lösung des Mehrebenenproblems in der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme auf den Skalen von Einzelgebäuden bis zur Quartiersebene.

(iii) Prototypische Implementierung einer geschlossenen Werkzeugkette zur Demonstration einer optimierten Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme:

- Übersichtliche Darstellung des Dimensionierungsprozesses und komplexer Systemzusammenhänge innerhalb eines neu entwickelten und implementierten Web-Systemkonfigurators, der eine detaillierte Dimensionierung und Bewertung des Gesamtsystems sowie Systemvergleiche auf der Grundlage technischer, energetischer, ökonomischer und klimarelevanter Entscheidungskriterien ermöglicht.
- Entwicklung und Implementierung eines auf den optimierten Planungsprozess ausgerichteten Black-Box-Wärmepumpensystemmodells für den Einsatz auf Einzelgebäude- und Quartiersebene, das Bewertungskenngrößen wie z. B. die JAZ genauer abbildet als gängige Planungswerkzeuge für Wärmequellenanlagen.
- Nutzung von Reduced-Order-Modell-Ansätzen und analytischen Berechnungsmethoden zur Erstellung von stundengenauen Gebäudelastkurven.
- Implementierung von Schnittstellen zur bidirektionalen Kopplung des Wärmepumpensystemmodells mit bestehenden Untergrundmodellen als Grundlage zur Abbildung dynamischer Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe, thermischen Speichern, der geothermischen Quellenanlage und dem Erdreich.
- Nutzung eines einheitlichen Dateiformats und Entwicklung einer auf die Werkzeugkette zugeschnittenen Datenstruktur zur Datenübertragung zwischen den einzelnen Werkzeugen sowie zur Anbindung eines bestehenden geothermischen Informationssystems und dadurch zur Ermöglichung einer zentralen, weitestgehend automatisierten Datenaggregation und geothermischen Standortbewertung sowie zur Unterstützung des Antrags- und Genehmigungsprozesses von oberflächennahen geothermischen Systemen.

1.5. Abgrenzung

Die übergeordneten Themenfelder der vorliegenden Arbeit sind die Nutzung oberflächennaher Geothermie als erneuerbare Energiequelle für den Wärmesektor und die simulationsbasierte Planung und Dimensionierung von geothermischen Wärmepumpensystemen. Für einen ganzheitlichen und gewerkeübergreifenden Planungsprozess, samt geothermischen Standortanalysen, einer geothermischen Potenzialermittlung, der Untersuchung genehmigungsrelevanter Kriterien und der Dimensionierung der Einzelsysteme sowie des Gesamtsystems, sind u. a. Geoinformationssysteme (GIS), Datenbanken, Dimensionierungswerkzeuge samt Bilanzierungen und Wirtschaftlichkeitsanalysen sowie die Kopplung von analytischen beziehungsweise numerischen Modellen samt Programmierschnittstellen notwendig. In Abbildung 1.1 ist die Einordnung der vorliegenden Arbeit innerhalb der eingesetzten Methoden, Modelle und Werkzeuge visualisiert.

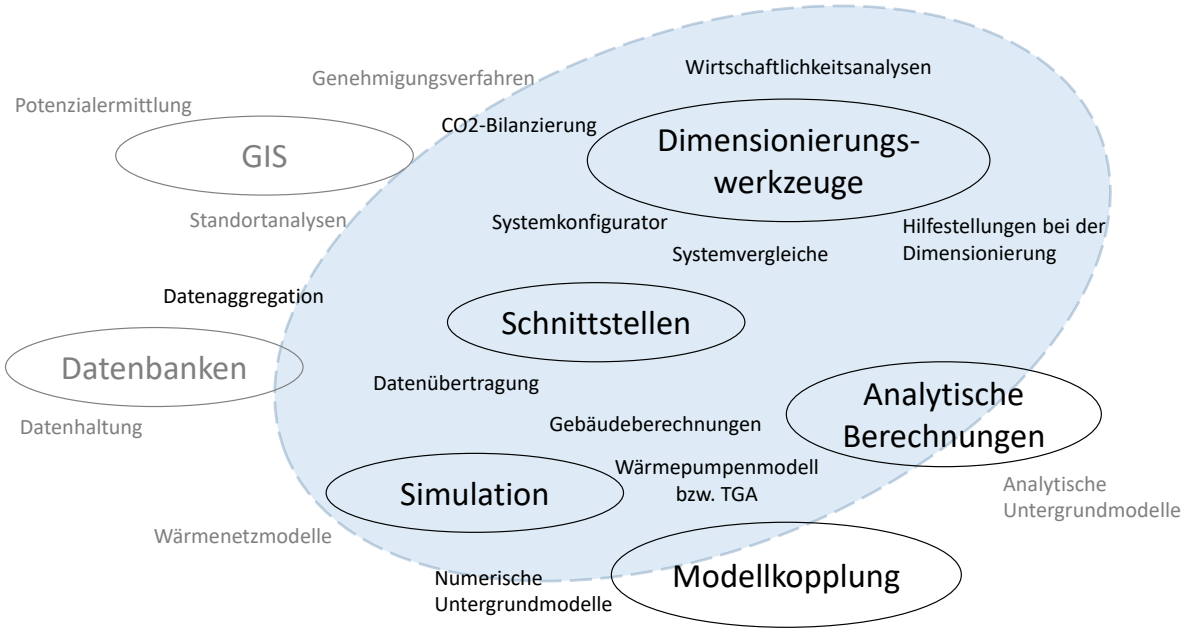


Abb. 1.1.: Bilanzgrenze der vorliegenden Arbeit (blau) im Kontext der in der Planung geothermischer Systeme eingesetzten Planungsmethoden, Modelle und Werkzeuge

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Bezeichnungen *oberflächennahes geothermisches System* oder *geothermisches Wärmepumpensystem* beinhalten grundlegend das Gesamtsystem aus geothermischer Wärmequellenanlage und der Heizungsanlage. In Anlehnung an die Bilanzgrenzen nach VDI 4645 bzw. VDI 4650 konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die *Wärmepumpenanlage* zuzüglich Speicher zur Bevorratung von Heizungswärme[5] und Trinkwarmwasser (TWW) (siehe Abbildung 1.2).[6] Die *geothermische Wärmequellenanlage* setzt

[5]Speicher zur Bevorratung von Heizungswärme werden im Folgenden als Pufferspeicher bezeichnet.

[6]Bzw. auf die *Wärmepumpenheizungsanlage* ohne den Heizkreis bestehend aus dem Heizungsverteil- und Heizwärmeübergabesystem (vgl. Abbildung 2.7).

sich aus dem geothermischen Wärmeübertrager, wie z. B. Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren, den Sammelleitungen, der Verteilerstation und der Soleumwälzpumpe oder, im Falle eines offenen Systems, aus Grundwasserbrunnen und der Grundwasserpumpe zusammen. Die Quellenanlage wird in der vorliegenden Arbeit vereinfacht dimensioniert, jedoch nicht simuliert.

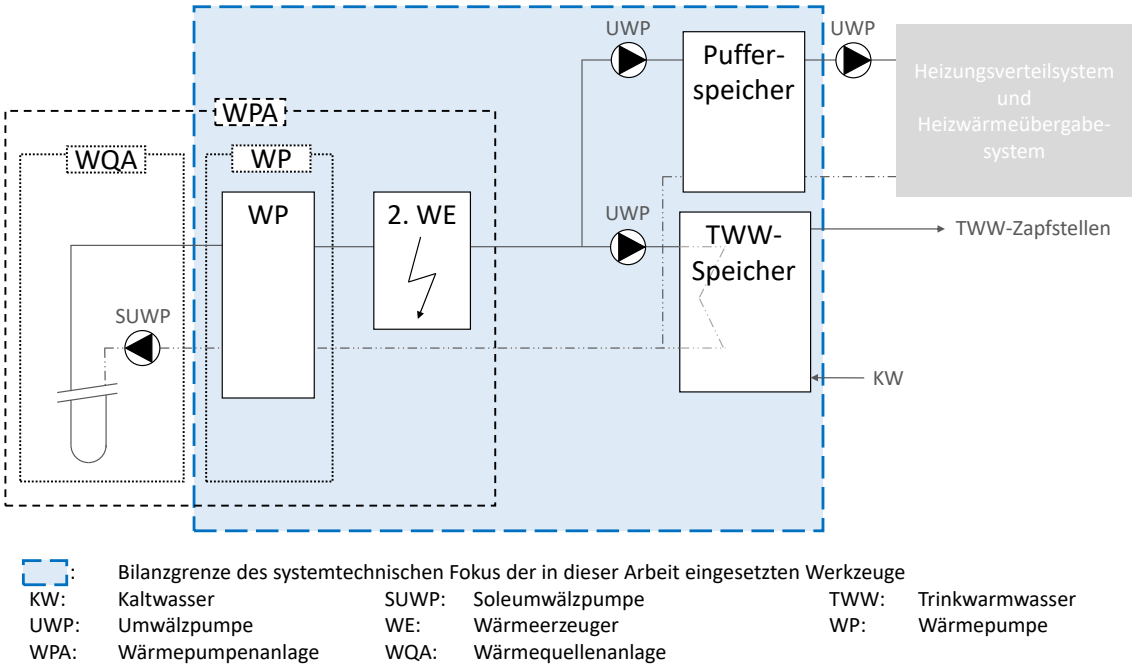


Abb. 1.2.: Systemtechnischer Fokus der in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Werkzeuge in Anlehnung an VDI 4645 [2018] und VDI 4650 [2019]

Geothermische Wärmepumpensysteme werden in Deutschland hauptsächlich zur Beheizung von Ein- und Mehrfamilienhäusern [Hilgedieck et al., 2019] sowie in Kombination mit Erdwärmesonden [Koenigsdorff u. Van de Ven, 2019] eingesetzt. Zusätzlich werden die meisten erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen mit Sole betrieben [Backhaus et al., 2021]. Aufgrund dessen liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Dimensionierung von elektrisch angetriebenen Sole-Wasser-Wärmepumpensystemen zur TWE und Beheizung von Wohngebäuden in Kombination mit Erdwärmesonden als geothermische Quellenanlage. Nichtwohngebäude mit geothermischer Gebäudekühlung sowie die Dimensionierung von Erdwärmekollektoren werden teilweise abgebildet. Sonstige geothermische Quellensysteme wie z. B. Brunnen, Energiekörbe, -pfähle oder -spundwände fallen nicht in den Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus werden ausschließlich taktende Sole-Wasser-Wärmepumpen thematisiert. Die Dimensionierung des Heizwärmeübergabesystems, wie z. B. Heizkörper oder Fußbodenheizungen, sowie die Dimensionierung des Heizungs- bzw. TWW-Verteilsystems, samt deren Rohrleitungen und Umwälzpumpen, sind nicht Bestandteile der vorliegenden Arbeit.

Der Einsatzbereich des entwickelten Mehrebenen-Planungswerkzeugs erstreckt sich von Einzelgebäuden über Gebäudegruppen und Stadtquartiere bis hin zur kommunalen Ebene. Da-

bei soll die simulationsbasierte Abbildung der Temperaturänderungen im Untergrund und die gegenseitige thermische Beeinflussung von Erdwärmesonden über Grundstücksgrenzen hinaus durch eine Schnittstelle zu Untergrundmodellen ermöglicht werden. Wärmenetzsimulationen fallen nicht in den Anwendungsbereich der vorliegenden Arbeit, jedoch ist die Kopplung von Wärmenetzmodellen an das Wärmepumpensystemmodell grundsätzlich möglich.

1.6. Struktureller Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel untergliedert. Im Anschluss an dieses Kapitel folgt das Kapitel *Planung geothermischer Wärmepumpensysteme*, in dem Grundlagen zur Geothermie, zu Wärmepumpen und zu den Planungsphasen oberflächennaher geothermischer Systeme dargestellt werden. Anschließend werden die planungsrelevanten Informationen und deren Zusammenhänge sowie bestehende Planungswerkzeuge und Werkzeugketten aus der Praxis und Literatur beschrieben. Die bestehenden Werkzeugketten werden hinsichtlich der Ganzheitlichkeit der betrachteten Planungsebenen und eingesetzten Methoden bewertet. Im Hauptteil der Arbeit (Kapitel 3) werden die Softwarestruktur und die beteiligten Werkzeuge des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Mehrebenen-Planungswerkzeugs sowie deren Anforderungen, Einsatzbereiche und Zielgruppen beschrieben. In Kapitel 4 wird das Mehrebenen-Planungswerkzeug und der simulationsbasierte Planungsprozess anhand eines Fallbeispiels demonstriert. Im Rahmen der Schlussbetrachtung in Kapitel 5 werden die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und im Zusammenhang mit den eingangs aufgestellten Forschungshypothesen und Zielen diskutiert. Daran anschließend werden Potenziale des entwickelten Mehrebenen-Planungswerkzeugs für weitere Forschungsaktivitäten aufgezeigt.

2. Planung geothermischer Wärmepumpensysteme

Die *Planung geothermischer Wärmepumpensysteme* beinhaltet u. a. Antrags- und Genehmigungsverfahren, die Dimensionierung[1] der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems sowie die Berücksichtigung bzw. weitgehende Vermeidung von Wechselwirkungen benachbarter geothermischer Quellenanlagen. Aufgrund dessen sind für die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme sowohl Kompetenzen in der Gebäudebedarfsermittlung und TGA als auch in der technischen Baugrundausstattung (TBA) gefordert [VBI, 2012].

Innerhalb dieses Kapitels werden Grundlagen, die einzelnen Planungsschritte geothermischer Wärmepumpensysteme sowie die planungsrelevanten Informationen und deren Zusammenhänge dargestellt. Anschließend werden bestehende Planungswerkzeuge und Werkzeugketten aus der Praxis und Literatur beschrieben. Die bestehenden Werkzeugketten werden hinsichtlich der Ganzheitlichkeit der betrachteten Planungsebenen, Planungsprozesse und Planungsmethoden bewertet.

2.1. Grundlagen der oberflächennahen Geothermie

Erdwärme bzw. geothermische Energie ist als das thermische Energiepotenzial unterhalb der Oberfläche des festen Erdreichs definiert [VDI 4640, 2021]. Die geothermische Energie beruht vorwiegend auf der solaren Einstrahlung und dem vom Erdkern zur Erdoberfläche gerichteten terrestrischen Wärmestrom [Rumohr et al., 2019]. Die terrestrische Wärmestromdichte setzt sich im Wesentlichen aus der Wärmeübertragung vom heißen Erdkern an die Oberfläche, dem Zerfall radioaktiver Isotope und chemischen Prozessen in der Erde zusammen [Geyer et al., 2020]. Sie schwankt zwischen 0,05 $\mathrm{W/m^2}$ und 0,12 $\mathrm{W/m^2}$ [VDI 4640, 2021] und beträgt im weltweiten Mittel an der Erdoberfläche ca. 0,065 $\mathrm{W/m^2}$ [Geyer et al., 2020]. Der Energiegehalt des Erdkerns resultiert hauptsächlich aus Gravitationsenergie, die bei der Entstehung der Erde freigesetzt wurde [Geyer et al., 2020].

[1] Häufig wird im Planungsprozess der Begriff Auslegung verwendet. Um Verwechslungen z. B. mit dem Einbringen von Erdwärmekollektoren (Auslegen der Kollektorrohre) zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff *Dimensionierung* benutzt.

Die direkte Sonneneinstrahlung und das Niederschlagswasser bestimmen maßgeblich die Temperaturen in den oberflächennahen Schichten [VBI, 2012]. In Abbildung 2.1 sind Temperaturverläufe des ungestörten Erdreichs, also ohne Beeinflussung von z. B. geothermischen Anlagen, über die Tiefe und Jahreszeiten dargestellt.

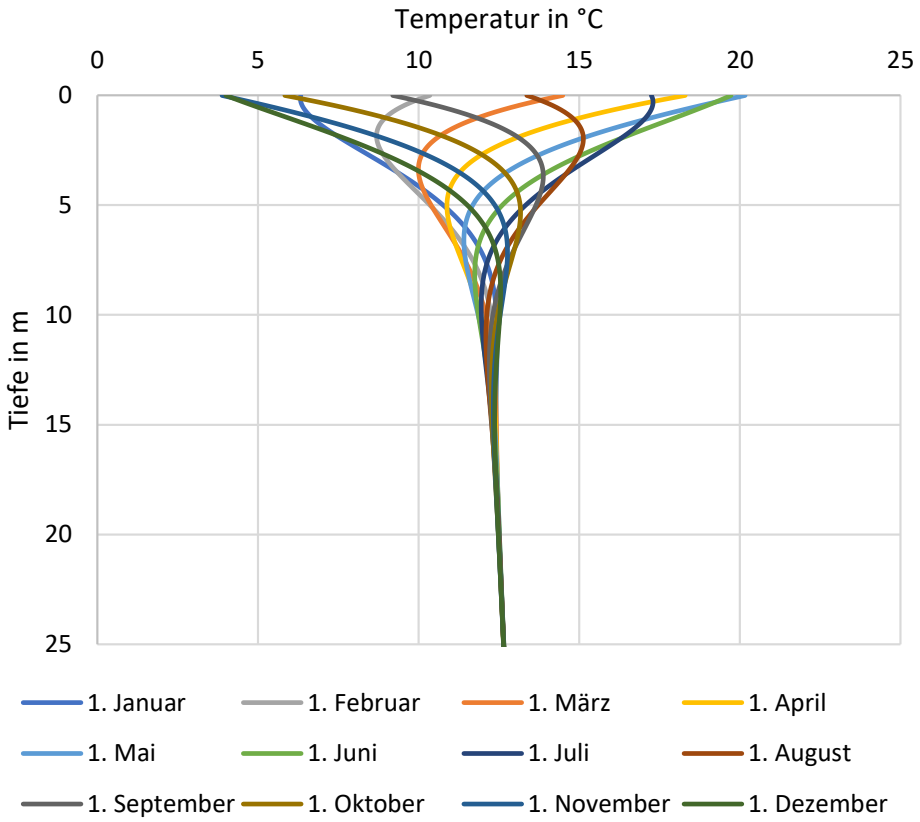


Abb. 2.1.: Typischer Temperaturverlauf im Untergrund über die Tiefe und Jahreszeiten [van Treeck et al., 2020]

Bis in ca. 15 m Tiefe sind Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche und im oberflächennahen Untergrund über die Jahreszeiten festzustellen (siehe Abbildung 2.1). Nach VDI 4640 [2021] wird die sogenannte neutrale Zone, in der die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen unterhalb von 0,1 K liegen, in Tiefen zwischen 10 m und 20 m verortet.

Die Untergrundtemperatur in der neutralen Zone liegt in Deutschland meist im Bereich von 8 °C bis 12 °C [VBI, 2012]. In Innenstadtgebieten können die Untergrundtemperaturen der neutralen Zone aufgrund von Flächenversiegelung und Wärmeeinträgen aus z. B. U-Bahntunneln, Wärmenetzen oder sonstigen Wärmeeinträgen in den Boden auch höher liegen. In größeren Stadtzentren werden Untergrundtemperaturen in 10 m bis 20 m Tiefe von bis zu 18 °C erreicht [VBI, 2012].

Unterhalb der neutralen Zone ist der terrestrische Wärmestrom maßgebend, durch den die Untergrundtemperatur im Mittel um 3 K pro 100 m Tiefe ansteigt [Geyer et al., 2020]. Bei geothermischen Anomalien können der geothermische Gradient und damit die ungestörten Erdreichtemperaturen durchaus höher sein.

Die Geothermie wird im Allgemeinen in oberflächennahe und tiefe Geothermie unterteilt. In Deutschland werden geothermische Systeme mit einer maximalen Tiefe von 400 m und Temperaturen von bis zu 25 °C der oberflächennahen Geothermie zugeordnet [Koenigsdorff, 2011]. Werden tiefere Areale erschlossen oder wird Wärme mit einem höheren Temperaturniveau genutzt, fallen die Anlagen unter den Begriff der tiefen Geothermie. Darüber hinaus wird in manchen Literaturquellen auch ein Zwischenbereich der mitteltiefen Geothermie erwähnt. Die zugehörigen Bohrtiefen sind nicht fest definiert und liegen im Bereich von ca. 400 m bis 1.000 m [BVG, 2022; LGRB, 2022; Michalzik, 2013] bzw. 400 m bis 800 m [Born et al., 2022]. In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die oberflächennahe Geothermie thematisiert.

In Abbildung 2.2 sind Einsatzmöglichkeiten der oberflächennahen Geothermie in urbanen Energiesystemen dargestellt. Der Anwendungsbereich reicht dabei von klassischen geothermischen Quellenanlagen wie Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren oder Brunnensystemen bis zu geothermischen Bauteilaktivierungen in Tunneln, an Spundwänden oder in Pfahlgründungen. Die oberflächennahe Geothermie kann als Wärmequelle für Wärmenetze mit niedrigem Temperaturniveau dienen und damit zur Dekarbonisierung der Quartiersebene beitragen.

Abb. 2.2.: Einbindung der oberflächennahen Geothermie in Energiesysteme [BWP, 2018]

Neben dem Erdreich oder wasserführenden Schichten im Untergrund sind in Bergbauregionen auch geothermische Wärmenutzungen über das Grubenwasser möglich. Grubenwasser kann aufgrund von Temperaturen zwischen 20 °C und 40 °C oft direkt für den Einsatz in Niedertemperaturheizsystemen genutzt werden [VBI, 2012]. Aufgrund der spezifischen Standortbedingungen stellt die Grubenwassernutzung eine Sonderform der Geothermie dar, die nicht flächendeckend ausgebaut werden kann. In Anlehnung an die Definition der oberflächennahen Geothermie wird die Grubenwassernutzung, aufgrund des höheren Temperaturniveaus

und der Tiefe der erschlossenen Ressource, oft nicht der oberflächennahen Geothermie zugeordnet.

Geothermische Quellenanlagen werden grundlegend in offene und geschlossene Systeme sowie in Systeme mit und ohne thermischer Rückkopplung unterteilt. Offene Systeme wie z. B. Grundwasserbrunnen nutzen das Grundwasser, indem dieses aus einem Grundwasserleiter entnommen, durch einen Wärmeübertrager geleitet und an anderer Stelle wieder in den Untergrund eingeleitet wird. Zur Entnahme werden Förderbrunnen und zur Wiedereinleitung Schluckbrunnen eingesetzt. Durch die direkte Entnahme von Grundwasser sowie die räumliche Trennung des Wärmeentzugs aus dem Untergrund und der Wärmeübertragung an den Untergrund induzieren einzelne Brunnenanlagen bei korrekter Anordnung in Abhängigkeit von der Grundwasserfließrichtung keine thermische Rückwirkung auf die geothermische Quelle, d. h. auf den Förderbrunnen. Somit wird dem System, bei gleichbleibenden Grundwasserverhältnissen, grundlegend die gleiche Wärme zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz dazu können sich mehrere Brunnenanlagen gegenseitig thermisch beeinflussen. Die Effizienz von Grundwasserbrunnen ist von der Ergiebigkeit des Entnahmebrunnens und der Versickerungsfähigkeit des Schluckbrunnens abhängig [VBI, 2012]. Durch Verockerung oder weitere Prozesse, die von der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers abhängen, nimmt die Leistung der Brunnen über die Jahre ab [VBI, 2012].

In geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgerfluid meist innerhalb von Polyethylenrohren, das die Wärme des umgebenen Erdreichs über Wärmeleitung und Konvektion aufnimmt. Bei der Gebäudebeheizung kühlt sich der Erdboden um die geothermische Quellenanlage ab und im Kühlfall nimmt er Wärme auf. Die Wärme wird im Untergrund aufgrund der trägen physikalischen Prozesse gespeichert. Somit wirken geschlossene Systeme grundsätzlich thermisch rückwirkend auf die geothermische Quellenanlage, d. h. auf die zukünftige Entnahmetemperatur. Als Wärmeträgerfluid wird i. d. R. Sole[2] eingesetzt, die den Betrieb bei tieferen Temperaturen als 0 °C erlaubt. Als Frostschutzmittel wird meistens Ethylenglycol verwendet. In Folge von zu hohen Wärmeentzügen aus der geothermischen Quellenanlage sind Frostschäden an der Anlage und die Kontamination des Erdreichs durch austretende Sole nicht ausgeschlossen. Frostgefahr besteht im Winter vor allem für Verteil- und Sammelleitungen, die nah an der Geländeoberfläche liegen [Bockelmann et al., 2011]. Insbesondere in Wasserschutzgebieten sind solche Szenarien zu vermeiden. Bei einer korrekten Dimensionierung der Wärmepumpe und der geothermischen Quellenanlage treten i. d. R. keine Frostschäden auf.

Auf dem Markt sind zahlreiche Varianten oberflächennaher geothermischer Wärmequellensysteme verfügbar. In Deutschland werden vor allem geschlossene Systeme wie z. B. Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren eingesetzt, die vertikal, schräg oder horizontal in den Untergrund eingebracht werden. Erdwärmekollektoren werden i. d. R. horizontal unterhalb der Frostgrenze in 1 m bis 1,5 m Tiefe verlegt [VBI, 2012]. Andere Literaturquellen geben Bereiche zwischen 1,2 m bis 1,5 m [Koenigsdorff, 2011] oder 0,8 m bis 2 m [DIN EN

[2]Die Sole ist ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel.

15450, 2007] an. Die Verlegetiefen können aufgrund unterschiedlicher Standortrandbedingungen und Bodenbeschaffenheiten regional unterschiedlich sein. Bei der horizontalen Verlegung wird entsprechend viel Platz auf dem Grundstück benötigt. Dieser Sachverhalt schränkt den Einsatz von Erdwärmekollektoren ein, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten und bei Bestandsbauten. Erdwärmekollektoren können z. B. übereinandergestapelt oder so betrieben werden, dass der Boden um die Kollektoren gefriert und die Energie des Phasenwechsels genutzt wird. Des Weiteren können Erdwärmekollektoren auch großflächig unterhalb eines Ackers[3] verlegt werden. Zusätzlich kann die geothermische Energie mithilfe von thermisch aktivierten Bauteilen (z. B. Energiepfähle, Tunnelwände oder Spundwände) oder Sonderformen von Erdwärmekollektoren (z. B. Erdwärmekörbe oder Grabenkollektoren) genutzt werden. Erdwärmekörbe sind spiralförmige Wärmeübertrager, die in eine ausgehobene Grube gesetzt werden. Grabenkollektoren werden vertikal in das Erdreich eingebracht. Innerhalb der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf geschlossenen Systemen, insbesondere auf Erdwärmesonden.

Erdwärmesonden werden in Deutschland aufgrund des Bergrechts meist in Bohrungen mit Tiefen von weniger als 100 m als Doppel-U-Sonde, also paarweise gebündelte U-förmige Kunststoffrohrschleifen, ausgeführt [VDI 4640, 2019]. Teilweise wird auch über 200 m tief gebohrt [VDI 4640, 2019]. Seltener werden auch Einfach-U-Sonden, Koaxialsonden oder Sonderbauformen wie Spiralsonden oder Direktverdampfersonden eingesetzt. Auf die Varianten der Erdwärmesonden wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

Für die Bohrungen werden i. d. R. sachkundige und zertifizierte Fachfirmen beauftragt [Koenigsdorff, 2011]. In den meisten Bundesländern ist die Beauftragung von zertifizierten Firmen sogar vorgeschrieben. Die Bohrlöcher um die Erdwärmesonden werden zur Abdichtung verfüllt. Zusätzlich dient die Verfüllung zur Schaffung einer Kontaktschicht zwischen den Sondenrohren und dem Erdboden mit einer möglichst hohen Wärmeleitfähigkeit, mechanischen Stabilität und Frostbeständigkeit [Koenigsdorff, 2011]. In Abhängigkeit von den am Standort vorhandenen Bodenschichten und deren Eigenschaften schwankt die maximal erreichbare Wärmeentzugsleistung von Erdwärmesonden im Bereich zwischen 20 W/m und 80 W/m [VBI, 2012].

Erdwärmesonden sind grundsätzlich überbaubar und können durch das Temperaturniveau unterhalb der neutralen Zone sowohl für die Beheizung und TWE als auch für die Gebäudekühlung eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Erdwärmekollektoren und Systemen, die nah an der Oberfläche liegen und größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, ist durch den Einsatz von Erdwärmesonden die saisonale Speicherung von z. B. aus Gebäuden abgeführter Wärme möglich. Die saisonale Wärmespeicherung im Boden fördert die thermische Regeneration des Untergrunds, begünstigt den Wärmeentzug in der nächsten Heizperiode und verhindert ein zusätzliches Aufheizen des Außenklimas von urbanen und dicht bebauten Gebieten im Sommer.

[3] Diese Nutzung wird auch als Agrargeothermie oder Agrothermie bezeichnet.

2.2. Geothermische Nutzung über Wärmepumpen

Die direkte Nutzung der oberflächennahen Geothermie zu Heizzwecken oder zur TWE ist in Deutschland aufgrund des nicht ausreichend hohen Quellentemperaturniveaus nicht möglich [VBI, 2012]. Daher kommen für die Versorgung eines Gebäudes mit oberflächennaher Erdwärme neben dem Wärmequellensystem zusätzlich Wärmepumpen zum Einsatz. Wärmepumpen heben das Temperaturniveau der Wärmequelle über einen linksläufigen thermodynamischen Kreisprozess auf ein nutzbares Niveau an (siehe Abbildung 2.3). Im Heizfall wird die Wärme des Quellenfluids ($\dot{Q}_{Boden}$) über einen Wärmeübertrager (Verdampfer) an das Arbeitsmittel in der Wärmepumpe übertragen, sodass es vollständig verdampft (4-1). Als Arbeitsmittel werden Kältemittel eingesetzt, die bei geringen Temperaturen und Drücken verdampfen. Das Druck- und Temperaturniveau des Dampfes wird über den Verdichter durch den Einsatz der elektrischen Leistungsaufnahme (P_{el}) erhöht (1-2), bevor die nutzbare Wärmeleistung ($\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$) über den Kondensator an die Sekundärseite[4] übertragen wird (2-3). Anschließend wird das Wärmepumpenfluid über ein Expansionsventil entspannt und der Prozess beginnt erneut (3-4).

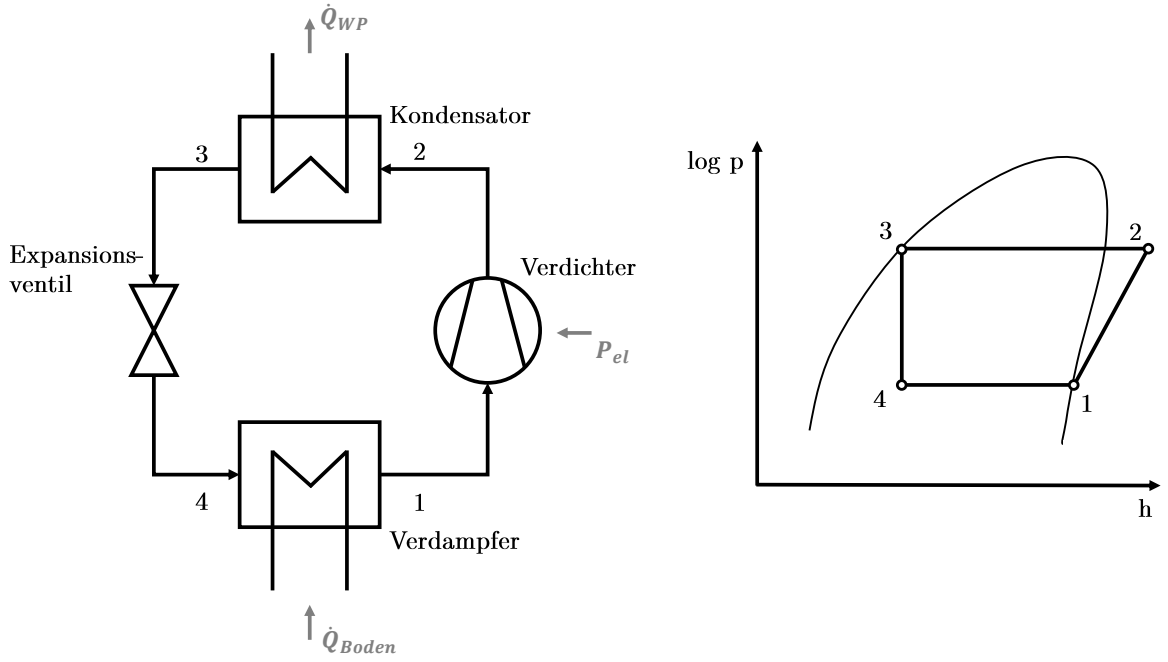


Abb. 2.3.: Schaltschema und Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe

Wärmepumpen können elektrisch oder thermisch angetrieben werden. In Deutschland werden hauptsächlich elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen[5] eingesetzt. Wärmepumpen

[4] In der Praxis werden häufig die Begrifflichkeiten Primär- und Sekundärseite verwendet. Die Sekundärseite beinhaltet u. a. das Heizwärmeübergabesystem, Heizungsverteilsystem sowie Puffer- und TWW-Speicher. Die Primärseite entspricht der geothermischen Wärmequellenanlage samt Soleumwälzpumpe. Seltener werden auch die Begriffe Quellen- und Senkenseite benutzt.

[5] Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen thematisiert. Im Folgenden wird der Einfachheit halber der Begriff *Wärmepumpe* verwendet.

unterscheiden sich zusätzlich bezüglich der Betriebsweise des Verdichters in taktende und leistungsgeregelte Wärmepumpen. Bei taktenden Wärmepumpen wird der Verdichter lediglich ein- und ausgeschaltet, sodass er stets auf voller Last läuft. Bei leistungsgeregelten Wärmepumpen wird die Verdichterdrehzahl und damit die Leistung der Wärmepumpe an den Bedarf angepasst. Das kann stufenlos oder über mehrere Verdichterbetriebspunkte realisiert werden.

Die Effizienz einer Wärmepumpe ist hauptsächlich von der Temperaturdifferenz zwischen der Primär- (Verdampfungstemperatur) und der Sekundärseite (Kondensationstemperatur) abhängig. Die maximale Effizienz des reversiblen linksläufigen Wärmepumpenkreisprozesses ist als Carnot-Leistungszahl (ϵ_c) definiert:

$$\epsilon_c = \frac{T_{\text{Senke}}}{T_{\text{Senke}} - T_{\text{Quelle}}} \tag{2.1}$$

In Abbildung 2.4 ist der Verlauf der Carnot-Leistungszahl über der Differenz der sekundär- und primärseitigen Temperaturen bei einer konstanten Senkentemperatur von 35 °C und einem Temperaturbereich des Wärmequellenaustritts von −5 °C bis 20 °C dargestellt. Mit sinkender Temperaturdifferenz steigt die Carnot-Leistungszahl. Bei dem Dimensionierungspunkt B0/W35[6] beträgt die Carnot-Leistungszahl 8,8. Die physikalisch erreichbare Leistungszahl der Wärmepumpe ist kleiner als die Carnot-Leistungszahl und beinhaltet u. a. Wärmeübertragungs- und Verdichterverluste.

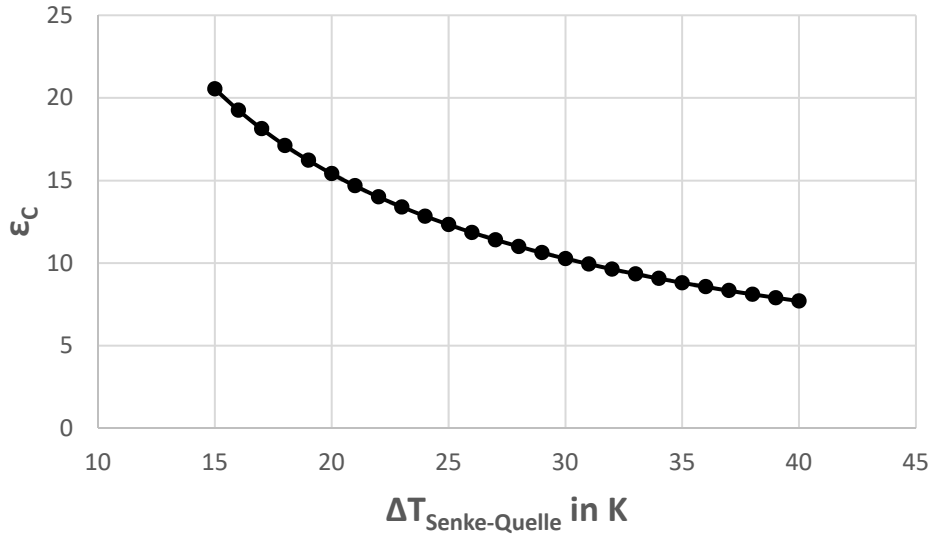


Abb. 2.4.: Verlauf der Carnot-Leistungszahl über die Temperaturdifferenz von Senke und Quelle bei einer Senkentemperatur von 35 °C und Quellentemperaturen von −5 °C bis 20 °C

[6]B = Sole (englisch: Brine); W = Wasser (englisch: Water); Für Produktangaben bei Sole-Wasser-Wärmepumpen wird i. d. R. eine Wärmequellenaustrittstemperatur von 0 °C und eine Heizungsvorlauftemperatur von 35 °C angesetzt.

Neben den Systemtemperaturen beeinflussen u. a. die Bauart und die Geräteeigenschaften der Wärmepumpe die Effizienz des Gerätes. Die Geräteeffizienz einer am Markt verfügbaren Wärmepumpe wird für einen fest definierten Betriebszustand unter Volllast durch den COP[7] (Coefficient of Performance) ausgedrückt. Der COP ist eine Gerätekennzahl und wird für Sole-Wasser-Wärmepumpen am häufigsten für B0/W35 angegeben. Er ist als das Verhältnis des Nutzwärmestroms[8] ($\dot{Q}_{\mathrm{Nutz}}$) zur elektrischen Leistungsaufnahme (P_{el}) der Wärmepumpe im Heizbetrieb definiert (siehe Formel 2.2). Die elektrische Leistungsaufnahme wird in DIN EN 14511 auch als effektive Leistungsaufnahme bezeichnet und beinhaltet, neben dem Strombedarf des Verdichters, zusätzlich die Leistungsaufnahme aller Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen des Gerätes sowie die anteilige Leistungsaufnahme von im Gerät integrierten Pumpen zur Sicherstellung des Wärmeträgertransports [DIN EN 14511, 2019a].

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{Nutz}}}{P_{\mathrm{el}}} \tag{2.2}$$

Die genormten Prüfbedingungen der COP-Messungen sind in DIN EN 14511 beschrieben. Beispielsweise beträgt die Wärmequelleneintrittstemperatur für den Betriebspunkt B0/W35 −3 °C [DIN EN 14511, 2019b]. Zusätzlich zu dem Prüfpunkt B0/W35 werden Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Wärmequellenaustrittstemperaturen von 5 °C und −5 °C sowie sekundärseitigen Vorlauftemperaturen von 45 °C, 55 °C und 65 °C geprüft [DIN EN 14511, 2019b].

In den Abbildungen 2.5 und 2.6 sind exemplarische Kennlinien der Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme einer Wärmepumpe nach Herstellerangaben mit zusätzlichen Prüfpunkten der Wärmequellenaustrittstemperaturen abgebildet. Die Herstellerkennlinien dieses Wärmepumpengeräts enthalten keine Werte für eine sekundärseitige Vorlauftemperatur von 65 °C, da das Gerät nur für maximal 60 °C ausgelegt ist. Mit steigenden Wärmequellenaustrittstemperaturen nehmen die Heizleistungen unabhängig von der Temperaturstufe zu, währenddessen die elektrischen Leistungsaufnahmen annähernd konstant bleiben. Somit ergeben sich bei höheren Wärmequellenaustrittstemperaturen auch höhere Leistungszahlen. Zusätzlich hat die Wärmepumpentemperaturstufe einen großen Einfluss auf die Leistungszahl. Je niedriger die sekundärseitige Vorlauftemperatur ist, desto höher ist die Heizleistung der Wärmepumpe und desto kleiner ist die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe. Folglich ergeben sich höhere Leistungszahlen bei geringen sekundärseitigen Vorlauftemperaturen.

[7] Der COP wird in der Praxis und Forschung oft auch als Leistungszahl bezeichnet. Für eine Abgrenzung der Wärmepumpeneffizienz zwischen Normprüfbedingungen und der Berechnung innerhalb von Simulationen wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff COP für die Effizienz der Wärmepumpe in den Betriebszuständen nach DIN EN 14511 und der Begriff Leistungszahl für das Verhältnis aus der Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe innerhalb von Simulationen oder Messungen verwendet.

[8] In der Literatur existieren verschiedene Bezeichnungen für den Wärmestrom, den die Wärmepumpe abgibt. Innerhalb der Richtlinien VDI 4650 und VDI 4645 wird der Begriff Nutzwärmestrom verwendet, wohingegen in der Norm DIN EN 15450 und bei manchen Wärmepumpenherstellerdatenblättern der Begriff Heizleistung genutzt wird. In der vorliegenden Arbeit werden beide Bezeichnungen verwendet.

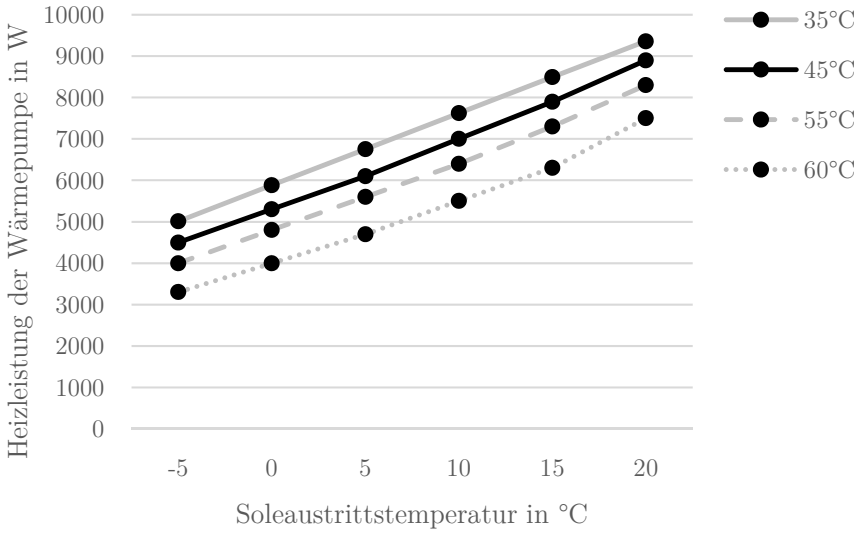


Abb. 2.5.: Exemplarische Kennlinien der Heizleistungen eines Wärmepumpengeräts des Typs *WPF 5 basic* für verschiedene Wärmequellenaustritts- und Systemvorlauftemperaturen

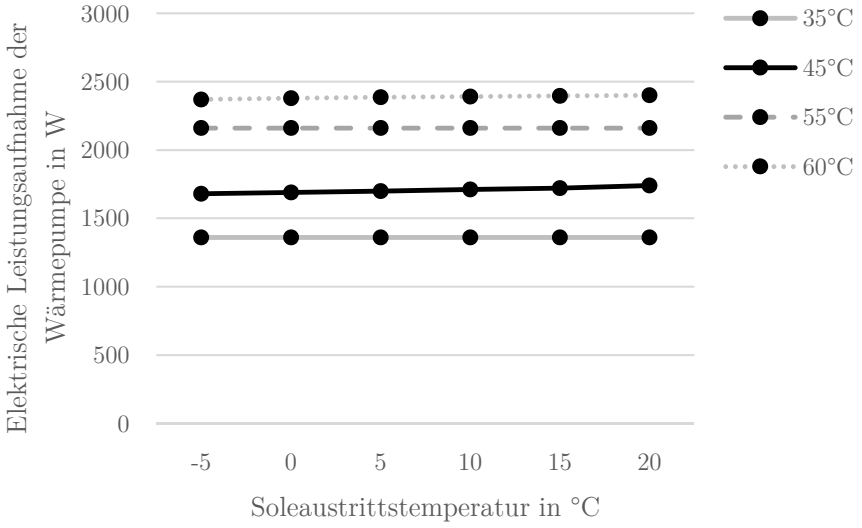


Abb. 2.6.: Exemplarische Kennlinien der elektrischen Leistungsaufnahme eines Wärmepumpengeräts des Typs *WPF 5 basic* für verschiedene Wärmequellenaustritts- und Systemvorlauftemperaturen

Ein zentraler Bewertungsparameter für die Dimensionierung und Wirtschaftlichkeitsanalysen ist die JAZ der Wärmepumpe. Sie ist als das Verhältnis aus der jährlichen Erzeugernutzwärmeabgabe[9] (E_{Nutz}) der Wärmepumpe zur jährlich eingesetzten elektrischen Arbeit (W_{el}) für

[9]Die Wärmeenergie, die die Wärmepumpe zur Raumheizung und TWE bereitstellen muss, ist als Erzeugernutzwärmeabgabe definiert. Sie entspricht der Nutzenergie zuzüglich Heizungsübergabeverluste, Verluste

den Verdichter, Hilfsantriebe und die Regelung definiert (siehe [VDI 4650, 2019] und Formel 2.3).

$$JAZ = \frac{E_{\text{Nutz}}}{W_{\text{el}}} \tag{2.3}$$

Die JAZ hängt maßgeblich von den primär- und sekundärseitigen Temperaturen in den einzelnen Betriebspunkten der Wärmepumpe ab. Für die TWE werden i. d. R. andere Vorlauftemperaturen verwendet als für Raumheizungszwecke, insbesondere, wenn Flächenheizungssysteme installiert sind. Die JAZ wird daher von der prozentualen Verteilung der beiden Modi beeinflusst (siehe [VDI 4650, 2019]).

In den Richtlinien und Normen wird zwischen der gemessenen und der berechneten JAZ unterschieden. Die berechnete JAZ (englisch: Seasonal Coefficient of Performance, SCOP) wird anhand standardisierter Randbedingungen und Systemgrenzen nach der Richtlinie VDI 4650 ermittelt. In Abbildung 2.7 sind die gängigen Systemgrenzen dargestellt.

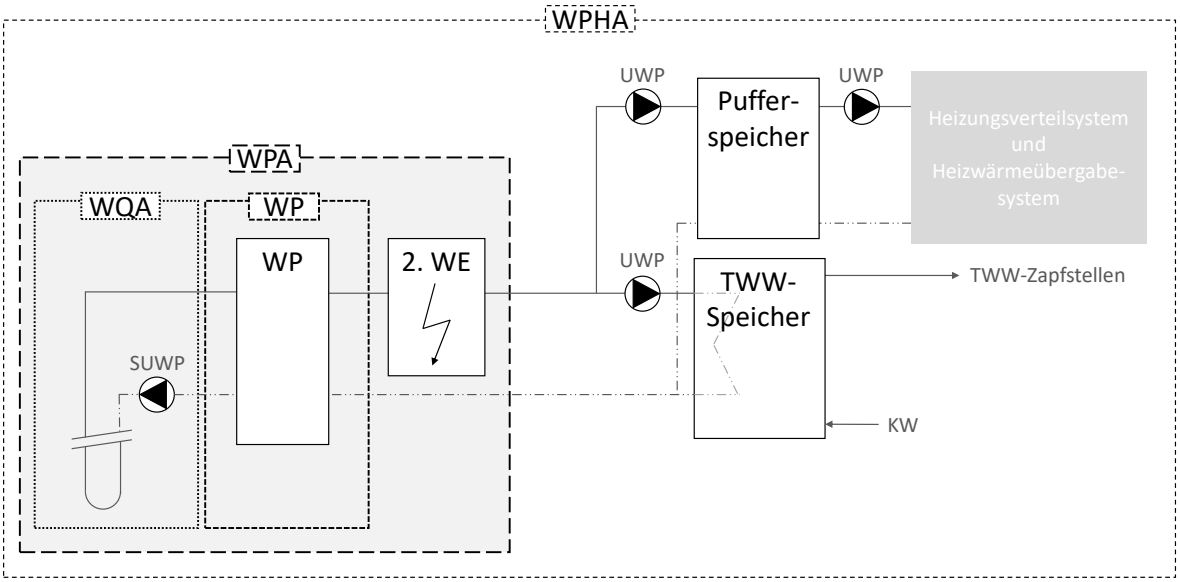


Abb. 2.7.: Bilanzgrenzen einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage in Anlehnung an VDI 4645 [2018] und VDI 4650 [2019]

Die Systemgrenze *Wärmepumpe* (WP) beinhaltet die Erzeugernutzwärmeabgabe der Kompressionswärmepumpe und die eingesetzte elektrische Energie für den Verdichter, die Hilfsantriebe und die Regelung [VDI 4650, 2019]. Die Bilanz um die *Wärmepumpenanlage* (WPA) enthält zusätzlich die elektrische Energie für den Betrieb der Soleumwälzpumpe und die elektrische Energie für den zweiten Wärmeerzeuger im Falle einer monoenergetisch betriebenen

für das Heizungs- und TWW-Verteilsystem sowie Verluste von Puffer- und TWW-Speichern (siehe [DIN V 18599, 2018b]).

Anlage. Die Systemgrenze *Wärmepumpenheizungsanlage* (WPHA) berücksichtigt darüber hinaus die elektrische Energie der Umwälzpumpen des Heizungsverteilsystems und der Umwälzpumpen zwischen der Wärmepumpe und den Speichern.

Der SCOP wird im Folgenden für Sole-Wasser-Wärmepumpen ohne solar unterstützte TWE anhand der Systemgrenze Wärmepumpenanlage in Anlehnung an VDI 4650 [2019] vorgestellt (siehe Formeln 2.4, 2.5 und 2.6).[10]

$$SCOP_{WPA} = \frac{1}{(1-y) \cdot \frac{\alpha}{SCOP_H} + y \cdot \frac{\alpha}{SCOP_{\mathrm{TWW}}} + 1 - \alpha} \tag{2.4}$$

Der SCOP der Wärmepumpenanlage wird mithilfe des Anteils der TWE am gesamten Wärmebedarf (y), des Deckungsanteils an der Raumheizung und TWE im bivalenten Betrieb der Wärmepumpe (α) sowie der SCOP für Heizung ($SCOP_H$) und TWW ($SCOP_{\mathrm{TWW}}$) berechnet.

$$SCOP_H = \frac{COP_{\mathrm{B0/W35}} \cdot F_{\Delta\vartheta} \cdot F_{\vartheta}}{F_P} \tag{2.5}$$

$$SCOP_{\mathrm{TWW}} = COP_{\mathrm{B0/W35}} \cdot \frac{F_{\Delta\vartheta} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_{\vartheta,\mathrm{Sole}}}{F_P} \tag{2.6}$$

Für die Berechnung von $SCOP_H$ und $SCOP_{\mathrm{TWW}}$ wird der COP bei B0/W35 ($COP_{B0/W35}$) aus Herstellerdaten herangezogen und unterschiedliche Korrekturfaktoren angesetzt. Die Korrekturfaktoren für abweichende Temperaturdifferenzen am Kondensator zwischen Messung und Betrieb ($F_{\Delta\vartheta}$) und für unterschiedliche Betriebsbedingungen der Sole-Wasser-Wärmepumpe (F_{ϑ}) werden anhand von Tabellen ermittelt. Bei der Bestimmung von F_{ϑ} wird zwischen taktenden oder leistungsgeregelten Verdichtern unterschieden. Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpen (F_P) wird bei bekannten Leistungsdaten der Pumpe berechnet oder für die Vorplanung mit 1,035 als konstant angesetzt. Für die Berechnung von $SCOP_{\mathrm{TWW}}$ werden zusätzlich die Korrekturfaktoren für abweichende Auslegungstemperaturen des TWW (F_1), für die TWE bei 50 °C (F_2) und für abweichende Soletemperaturen ($F_{\vartheta,\mathrm{Sole}}$) benötigt. F_1 und $F_{\vartheta,\mathrm{Sole}}$ können tabellarisch ermittelt werden. F_2 ist als konstanter Faktor definiert, der sich anhand der Bauform des Wärmeübertragers im TWW-Speicher unterscheidet.

Zusammenfassend wird der SCOP durch eine über das Jahr als konstant angenommene Nennquellentemperatur, die Betriebsweise der Wärmepumpe, die Art des Verdichters, den COP aus Herstellerangaben, abgeschätzte TWW- und Heizungsdeckungsanteile sowie angenommene Systemtemperaturen beeinflusst. Innerhalb der konstanten Nennquellentemperatur und der davon abhängigen Tabellen und angesetzten Faktoren sind jahreszeitliche

[10] Manche in VDI 4650 verwendeten Indizes wurden an die Zeichenkonvention der vorliegenden Arbeit angepasst.

Schwankungen der Untergrundtemperatur und die Temperaturabnahme über die Nutzungsperiode implizit berücksichtigt [VDI 4650, 2019]. Das Verfahren zur Berechnung des SCOP kann für eine erste Abschätzung der Systemeffizienz innerhalb der Dimensionierung eingesetzt werden. Die Systemeffizienz sowie beispielsweise der Deckungsanteil des Heizstabes bei einem monoenergetischen Betrieb sollten jedoch detaillierter ermittelt werden, insbesondere für Wirtschaftlichkeitsanalysen und ökologische Betrachtungen. Hierfür eignen sich Wärmepumpensystemsimulationen, die im Idealfall an ein Untergrundmodell gekoppelt sind.

Neben dem SCOP kann mithilfe der Richtlinie VDI 4650 auch ein entsprechender Wert für Kühlanwendungen berechnet werden. Bezüglich Kühlanwendungen können zwei Verfahren eingesetzt werden: die aktive und die passive Kühlung. Bei der aktiven oder indirekten Kühlung ist die Wärmepumpe in Betrieb. Dabei wird die Wärmeübertragung z. B. durch Drei- bzw. Vier-Wege-Ventile umgekehrt, sodass der Kreisprozess aus Abbildung 2.3 entgegengesetzt läuft. Systemtechnisch bzw. hydraulisch sind zwei Varianten bei der aktiven Kühlung möglich: a) über eine Richtungsumkehr im Kältemittelkreislauf in der Wärmepumpe und b) über ein externes Hydrauliksystem, sodass der Verdampfer und Kondensator mit dem jeweils anderen System (Geothermie, Gebäude) verbunden werden. Wärmepumpen, die aktiv kühlen können, werden als reversible Wärmepumpen bezeichnet. Für die passive Kühlung werden auch die Begriffe der *direkten Kühlung* bzw. der *direkten geothermischen Kühlung*[11] genannt. Bei der direkten geothermischen Kühlung ist der Kältekreislauf der Wärmepumpe nicht in Betrieb. Die Wärme aus dem Gebäude wird somit im reinen Umwälzbetrieb direkt und ohne Nutzung der Wärmepumpe in das Quellensystem übertragen. Dazu ist oft ein zusätzlicher Wärmeübertrager erforderlich [Bockelmann et al., 2011]. Auf die berechnete Kältearbeitszahl (englisch: Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER) wird aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit auf Heizen und TWE nicht näher eingegangen.

Anstatt der Nutzung von VDI 4650 kann zur Berücksichtigung von Teillastbedingungen DIN EN 14825 herangezogen werden. Mithilfe dieser Norm kann u. a. eine saisonale Arbeitszahl im Heiz- und Kühlbetrieb, das Teillastverhältnis oder die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz (η_s) bestimmt werden. Beispielsweise ist ein ausreichend hohes η_s ein notwendiges Kriterium für die Bewilligung von Förderungen durch die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG).

Die gemessene JAZ[12] (englisch: Seasonal Performance Factor, SPF) beschreibt das Messwertverhältnis der Erzeugernutzwärmeabgabe der Wärmepumpe bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie [VDI 4650, 2019]. Die eingesetzte elektrische Energie setzt sich aus dem Strombedarf des Verdichters sowie dem Strombedarf für Hilfsantriebe und der Regelung zusammen [VDI 4650, 2019]. Der SPF hängt, neben den gemessenen Quellen- und Systemtemperaturen, u. a. auch von der Installationsqualität, dem Anlagenbetrieb, dem Nutzerverhalten sowie der Dimensionierung des Systems und den dafür angesetzten Randbedingungen

[11] Im Folgenden wird der in Koenigsdorff [2011] genutzte Begriff der direkten geothermischen Kühlung verwendet.

[12] Im Folgenden wird der Begriff JAZ als Oberbegriff genutzt, um die energiebezogene Effizienz der Wärmepumpe im Allgemeinen auszudrücken. Wird speziell auf die berechnete oder gemessene JAZ eingegangen werden entsprechend die Begriffe SCOP bzw. SPF verwendet.

ab. Beispielsweise kann eine falsch dimensionierte monoenergetisch betriebene Anlage, bei zu hohem Heizstabanteil, zu einem niedrigeren SPF führen.

In Miara et al. [2011], Günther et al. [2014] und Günther et al. [2020] wurden innerhalb von Feldtests der SPF von Sole-Wasser-Wärmepumpen mit unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen miteinander verglichen. In Miara et al. [2011] wurde ein durchschnittlicher SPF von den in dieser Studie überwachten Sole-Wasser-Wärmepumpen von 3,9 ermittelt. In einer späteren Projektphase konnte der durchschnittliche gemessene SPF infolge von Optimierungen des Anlagenbetriebs auf 4,1 erhöht werden [Miara et al., 2011]. In Günther et al. [2014] erzielten die untersuchten Erdreichwärmepumpen einen mittleren SPF von 4. In einem Folgeprojekt wurde für an Erdwärmesonden angeschlossene Wärmepumpen ein SPF zwischen 3,3 und 4,7 mit einem Mittelwert von 4,1 ermittelt [Günther et al., 2020].

Neben der JAZ können auch saisonale oder monatliche Arbeitszahlen berechnet bzw. gemessen werden. Dabei sind für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit, wie bei der Bestimmung der JAZ, einheitliche Randbedingungen und Systemgrenzen zu verwenden.

2.3. Geothermisches Potenzial

Das zur Verfügung stehende Energieangebot im oberflächennahen Untergrund und dessen Nutzungspotenzial hängt, neben dem Wärmepumpenbetrieb, von den thermischen Bodeneigenschaften, der Bodentemperatur, dem Grundwasserregime, der Art der geothermischen Quellenanlage, der Flächenverfügbarkeit, der Rauminanspruchnahme geothermischer Systeme, der Dimensionierung und dem Betrieb des Gesamtsystems sowie vom Wärmeentzug bzw. -eintrag bestehender und zukünftig in der Nachbarschaft installierter geothermischer Anlagen ab. Zusätzlich wird das Untergrundtemperaturniveau und das geothermische Potenzial durch Gebäude und sonstige Bauten, die ganz oder teilweise im Untergrund liegen, beeinflusst (siehe u. a. [Epting et al., 2017a; Epting u. Huggenberger, 2013; Epting et al., 2017b; García-Gil et al., 2015; Hein et al., 2016b]).

Innerhalb des Potenzialbegriffs wird zwischen dem theoretischen, technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und realisierbaren Potenzial unterschieden [Brauner, 2019]. Oft wird das technische Potenzial auf der Grundlage des Erzeugerwirkungsgrads und technischer oder genehmigungsrelevanter Restriktionen herangezogen. Ermittelte Potenziale können zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen verschiedenen Studien beinhalten, da u. a. die verfügbaren Flächen vom Studienjahr abhängig sind, verschiedene Annahmen und Bilanzgrenzen zu Grunde liegen und die Abgrenzungen zwischen den Potenzialarten nicht zwingend präzise sind [Kaltschmitt et al., 2020]. Für die Ermittlung des geothermischen Potenzials sind, neben geologischen und hydrogeologischen Informationen, eine Reihe von GIS-basierten Analysen notwendig, sodass bislang wenige großflächige Potenzialstudien zur oberflächennahen Geothermie vorhanden sind.

Als bisher einziges Bundesland hat Nordrhein-Westfalen (NRW) eine detaillierte Studie zur flächendeckenden Potenzialermittlung der oberflächennahen Geothermie erarbeitet. Die Studie berücksichtigt ausschließlich Erdwärmesonden mit einer Tiefe von bis zu 100 m [Bracke et al., 2015]. Demnach betrug das technische Potenzial für Erdwärmesonden in NRW im Jahr 2015 153,7 TWh, mit dem 56,7 Prozent des Wärmebedarfs von 2015 gedeckt werden könnte (Szenario A) [Bracke et al., 2015]. Im Szenario B, in dem die Wasserschutzzonen III, IIIa, IIIb und IIIc nicht berücksichtigt wurden, betrug das technische Potenzial 141,3 TWh/a und der Deckungsanteil 52,1 Prozent [Bracke et al., 2015].

In Jochum et al. [2017] wurden Grenzen für das technische Potenzial von Sole-Wasser-Wärmpumpen mit Erdwärmesonden für Deutschland auf der Grundlage von rund drei Millionen abgebildeten Baublöcken abgeschätzt. Dabei wurden Restriktionen wie z. B. Wasserschutzgebiete, begrenzte Entzugsleistungen aufgrund wasserrechtlicher Vorgaben, hohe Vorlauftemperaturen bestehender Heizwärmeübergabesysteme im Gebäudebestand, Mindestabstände der Bohrungen, überbaute Flächen und Abstände zu Bäumen berücksichtigt. Das abgeschätzte Potenzial zur Deckung des prognostizierten Nutzwärmebedarfs für das Jahr 2050 beträgt im Trendszenario zwischen 145 TWh und 186 TWh und in dem ambitionierten Sanierungsszenario zwischen 116 TWh bis 124 TWh [Jochum et al., 2017].

In Born et al. [2022] wird das Potenzial von geothermischen Wärmepumpen in Deutschland zu 600 TWh pro Jahr, mit einem Deckungsanteil von bis zu 75 Prozent des aktuellen Nutzwärmebedarfs für Raumwärme und TWW, abgeschätzt. Dabei wurde die Potenzialstudie von NRW nach Bracke et al. [2015] als Grundlage herangezogen und anhand von weiteren Einsatzmöglichkeiten und der Verringerung von Restriktionen, wie z. B. eine maximale Tiefe der Erdwärmesonden von 200 m sowie die Berücksichtigung von neuen Bohrtechniken, Brunnenanlagen und Niedertemperaturwärmenetzen, auf Deutschland erweitert [Born et al., 2022].

Die in den vorgenannten Studien abgeschätzten technischen Potenziale verdeutlichen die Möglichkeiten der oberflächennahen Geothermie in der zukünftigen Wärmeversorgung. Jedoch werden die geothermischen Potenziale aktuell nicht ausgeschöpft. Um die Potenziale zu heben, bedarf es einer effizienten und qualitativ hochwertigen Planung. In den folgenden Abschnitten wird auf die Planung oberflächennaher Sole-Wasser-Wärmepumpensysteme nach dem aktuellen Stand der Technik eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf Erdwärmesonden.

2.4. Leistungsphasen der Planung oberflächennaher Geothermieanlagen

In der *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)* [HOAI, 2018], dem *VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie* [VBI, 2012] und der *AHO Nr. 26 – Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie* [AHO, 2011] werden die Planungsaufgaben

für oberflächennahe geothermische Heiz- und Kühlsysteme anhand von folgenden Leistungsphasen beschrieben.

- **LP1:** Grundlagenermittlung
  - Bedarfsanalyse
  - Machbarkeit prüfen
- **LP2:** Vorplanung
- **LP3:** Entwurfsplanung
- **LP4:** Genehmigungsplanung
- **LP5:** Ausführungsplanung
- **LP6:** Vorbereitung der Vergabe
- **LP7:** Mitwirkung bei der Vergabe
- **LP8:** Bauüberwachung und Dokumentation
- **LP9:** Objektbetreuung

Im VBI-Leitfaden wird den Leistungsphasen der Planung zusätzlich noch die Betriebsüberwachung und die Stilllegung der Anlagen zugeordnet [VBI, 2012]. Die Planungsleistungen werden in Grundleistungen und besondere Leistungen aufgeteilt. Besondere Leistungen können nur durch eine schriftliche Honorarvereinbarung zwischen den Beteiligten vergütet werden [VBI, 2012].

LP1: Grundlagenermittlung

Innerhalb der Grundlagenermittlung werden u. a. die Aufgabenstellung, Nutzungsziele bzw. der Einsatzbereich der Geothermieanlage festgelegt [VBI, 2012]. Der Einsatzbereich der Anlage ist i. d. R. eine Kombination aus den Nutzungen Heizen, TWE, Kühlen oder saisonale Wärmespeicherung. Als Teil der Grundlagenermittlung werden innerhalb der Bedarfsanalyse Energiebedarfe und Wärmelasten der Sektoren Wärme und Kälte ermittelt und präzisiert [HOAI, 2018]. Zusätzlich werden in der Grundlagenermittlung das geothermische Potenzial, die geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen am Standort abgeschätzt sowie Kennzahlen des Systems, wie z. B. der SCOP und die Betriebsweise der Wärmepumpe, Vorlauftemperaturen, Massen- bzw. Volumenströme sowie maximale und minimale Temperaturgrenzen des Untergrunds, konkretisiert (siehe [AHO, 2011; HOAI, 2018; VBI, 2012]). Darüber hinaus werden in der Grundlagenermittlung vereinzelt auch thermische und hydraulische Umweltauswirkungen über Umweltverträglichkeitsstudien abgeschätzt sowie Testarbeiten zur Parameterermittlung durch beispielsweise Probebohrungen und Probenahmen durchgeführt [AHO, 2011; HOAI, 2018; VBI, 2012].

Neben der Bedarfsanalyse kann innerhalb der Grundlagenermittlung zusätzlich die Machbarkeit am Projektstandort mittels technischer und genehmigungsrechtlicher Randbedingungen sowie teilweise auch anhand von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen überprüft werden [HOAI, 2018]. Mithilfe von Machbarkeitsstudien werden die Projektrandbedingungen analysiert und eine Vorauswahl an einsetzbaren Technologien und Verfahren erarbeitet. In Machbarkeitsstudien bzw. Machbarkeitsvorprüfungen können u. a. die wirtschaftliche, gebäudetechnische und geothermische Realisierbarkeit des Projektes überprüft werden. Für die gebäudetechnische und geothermische Betrachtung werden i. d. R. zwei getrennte Machbarkeitsstudien angefertigt [VBI, 2012].

Geothermische Machbarkeitsvorprüfungen beinhalten eine Einschätzung des thermischen Potenzials am Standort, des thermischen Regenerationsvermögens, der Möglichkeiten und Grenzen der thermischen Erschließung sowie der Auswirkungen des Betriebs der geothermischen Anlage auf den umgebenen Untergrund [VBI, 2012]. Innerhalb dieser Phase werden gegebenenfalls bereits Risikofaktoren für das Projekt wie z. B. Altlasten, Kampfmittel oder Altbergbau identifiziert [AHO, 2011]. Die geothermische Machbarkeit wird durch die geothermische Standortanalyse grundsätzlich in Projekten, in denen geothermische Systeme zum Einsatz kommen sollen, in einem bestimmten Detailgrad geprüft.

Aufgrund der Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten für die Wärmebereitstellung im Gebäudebereich werden innerhalb von gebäudetechnischen Machbarkeitsstudien oft Variantenvergleiche zwischen verschiedenen Wärmeerzeugersystemen auf einer niedrigeren Detailebene eingesetzt. Dafür ist neben der Bedarfsanalyse u. a. auch die Abschätzung der Systemeffizienz erforderlich. In frühen Planungsphasen, in denen die Auswahl des Energiesystems noch nicht final getroffen ist, können Erzeugervariantenvergleiche anhand von wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien die vermehrte Integration von erneuerbaren Energien und die Dekarbonisierung des Wärmesektors befördern. Im Gegensatz zur geothermischen Machbarkeit wird bei Einfamilien-, Zweifamilienhäusern oder kleineren Einzelgebäuden oft auf gebäudetechnische Systemvergleiche verzichtet und anhand von Projekterfahrungen und Standardwerten geplant.

LP2: Vorplanung

Innerhalb der Vorplanung werden die in der Grundlagenermittlung erstellten Wärmeerzeuger- oder Geothermienutzungsvarianten diskutiert, Varianten ausgeschlossen bzw. bevorzugt sowie die geothermischen Anlagen, der Hausanschluss und die Gebäudetechnik vordimensioniert [AHO, 2011; HOAI, 2018; VBI, 2012]. Dabei werden weitere Randbedingungen wie z. B. das Platzangebot für die geothermische Quellenanlage am Standort oder das Nutzerverhalten abgeschätzt [VBI, 2012].

In Abhängigkeit von der Leistungsart und Anlagengröße werden in der Vorplanung teilweise weitere Erkundungsarbeiten wie z. B. ein TRT durchgeführt [AHO, 2011]. Im Gegensatz zu

kleineren Anlagen, in denen die Bodenkennwerte vereinfacht über vorhandene oder prognostizierte Bohrprofile sowie hydrogeologische Daten ermittelt werden können, sind zur Erkundung der standortspezifischen Untergrundeigenschaften bei größeren Anlagen ein TRT oder ein Enhanced Geothermal Response Test (EGRT) notwendig [VBI, 2012]. Ein TRT ermittelt die mittlere Wärmeleitfähigkeit der vorhandenen Bodenschichten, den effektiven Bohrlochwiderstand und die mittlere ungestörte Untergrundtemperatur anhand des Temperaturanstiegs einer Testsonde, die mit einer konstanten Wärmeleistung beaufschlagt wird [VBI, 2012]. Der EGRT liefert diese Kennwerte zusätzlich tiefenaufgelöst und schichtspezifisch [VBI, 2012].

In der Vorplanung werden die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aus der Grundlagenermittlung beispielsweise in Form von Kostenschätzung der Systembestandteile nach DIN 276 spezifiziert [AHO, 2011].

LP3: Entwurfsplanung

Auf die Vorplanung folgt die Entwurfsplanung, in der die Anlagenparameter, die Kosten und die Dimensionierung der geothermischen Anlage und Gebäudetechnik weiter präzisiert werden [VBI, 2012]. In der Entwurfsplanung werden teilweise detaillierte Wirtschaftlichkeitsnachweise wie z. B. Betriebskostenberechnung oder Lebenszykluskosten für die ausgewählte Anlage erarbeitet und Gebäudesimulationen eingesetzt [HOAI, 2018]. Darüber hinaus findet eine Vorabstimmung mit Genehmigungsbehörden und weiteren Entscheidungsträgern statt [AHO, 2011].

LP4: Genehmigungsplanung

Im Anschluss an die Vorabstimmung mit Behörden erfolgt in der Genehmigungsplanung die Erstellung der Antrags- und Genehmigungsunterlagen samt der vollständigen Berücksichtigung von Projektrisikofaktoren [AHO, 2011; HOAI, 2018].

LP5: Ausführungsplanung

Innerhalb der Ausführungsplanung erfolgt die Präzisierung und Detailplanung der geothermischen Anlage und der Gebäudetechnik [HOAI, 2018]. In dieser Phase werden u. a. Auflagen und Hinweise aus den behördlichen Genehmigungsverfahren umgesetzt, der SCOP berechnet und die Anordnung der Erdwärmesonden festgelegt [AHO, 2011; VBI, 2012].

LP6 und 7: Vorbereitung und Mitwirkung bei der Vergabe

Insbesondere bei größeren Projekten sind innerhalb dieser Projektphasen Ausschreibungsunterlagen, Leistungsverzeichnisse und Bauablaufpläne zu erstellen und zu bewerten sowie das Projekt an die ausführenden Unternehmen zu vergeben [AHO, 2011; HOAI, 2018; VBI, 2012].

LP8: Bauüberwachung und Dokumentation

Im Anschluss an die Vergabe folgt die Bauüberwachung und Dokumentation, in der die Qualität und Funktionstüchtigkeit der geothermischen Anlage und der Gebäudetechnik sichergestellt werden [AHO, 2011]. Das beinhaltet u. a. die Begleitung und Überprüfung der Bohrarbeiten, das Einstellen und die Einregulierung der Anlage unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, eine Zeitplanüberwachung und eine erste Nutzereinweisung für den Anlagenbetreiber vor der Abnahme [AHO, 2011; VBI, 2012]. Zusätzlich wird in dieser Phase die Anlage abgenommen, dokumentiert und an den Anlagenbetreiber final übergeben sowie eventuelle Mängel festgestellt und beseitigt [HOAI, 2018; VBI, 2012].

LP9: Objektbetreuung

Die letzte Leistungsphase ist die Objektbetreuung. In dieser Leistungsphase werden die innerhalb der Verjährungsfristen für Gewährleistungsansprüche festgestellten Mängel bewertet und durch eine Objektbegehung überprüft [HOAI, 2018]. Für die Gewährleistung eines effizienten Anlagenbetriebs ist eine anschließende Betriebsoptimierung mit einem kontinuierlichen Monitoring und der Anpassung der Anlagenregelung auf das Nutzerverhalten sinnvoll [VBI, 2012]. In Wohngebäuden wird ein Anlagenmonitoring aus Kostengründen i. d. R. selten eingesetzt. Dadurch wird der Betrieb in den meisten Wohngebäuden nicht überwacht und Ursachen für einen eventuell fehlerhaften Betrieb oder eine geringe Systemeffizienz nicht ermittelt.

Die Planung wird in die Bereiche TBA und TGA unterteilt [VBI, 2012]. Dadurch entstehen Schnittstellen zwischen den beteiligten Gewerken mit Kommunikationsaufwand und Fehlerpotenzial. Die Schnittstellen erfordern in jeder Phase eine bestmögliche Abstimmung der beteiligten Gewerke, um Planungsfehler frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Beispielsweise kann der Einsatz von BIM (Building Information Modeling) die kooperative Zusammenarbeit und den gewerkeübergreifenden Dialog der Beteiligten durch gemeinsame digitale Prozesse verbessern (siehe [van Treeck, 2016; van Treeck et al., 2019]). Mit BIM als Methode können Entscheidungsprozesse und Kosten in frühe Planungsphasen verschoben werden [van Treeck, 2016]. Das führt einerseits zu einem erhöhten Aufwand in den frühen Leistungsphasen und andererseits zu einer deutlichen Verbesserung der Kostensicherheit [van Treeck,

2016]. Zusätzlich kann der Einsatz von gewerkeübergreifenden Simulations- und Berechnungswerkzeugen sowie Wirtschaftlichkeitsanalysen und ökologischen Bewertungen innerhalb von Machbarkeitsstudien und Systemvergleichen in den frühen Planungsphasen diesen Sachverhalt unterstützen.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden hauptsächlich die Leistungsphasen der Grundlagenermittlung und Vorplanung sowie teilweise der Entwurfsplanung tangiert, in denen die Systemvariante anhand der Bedarfsanalysen vorkonzeptioniert und auf Grundlage von Machbarkeitsstudien mit integrierten Wirtschaftlichkeitsanalysen und Systemvergleichen ausgewählt wird.

Kostenabschätzungen oder Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen treten über jede Leistungsphase in unterschiedlichen Detailgraden auf. Im Gegensatz zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind ökologische Bewertungen innerhalb der Leistungsphasen oft nur als optionale Leistungen abgebildet. Im Hinblick auf die Bewältigung der Klimakrise und die Beschleunigung der Transformation des Energiesystems rücken ökologische oder klimarelevante Bewertungsgrößen wie die THG-Emissionen oder der Primärenergieverbrauch in den Fokus. Die CO_2-Äquivalente der eingesetzten Energieträger und die in Deutschland im Jahr 2021 eingeführte CO_2-Bepreisung auf fossile Brennstoffe im Gebäudebereich koppeln die klimarelevante und wirtschaftliche Betrachtung. Die Höhe der Bepreisung entscheidet dabei über die Lenkungswirkung im Markt.

2.5. Planungsrelevante Informationen

Die Planung geothermischer Systeme erfordert bereits in frühen Leistungsphasen eine Vielzahl an Informationen, die aus diversen Bezugsquellen aggregiert werden müssen. Neben geothermischen Standortrandbedingungen, wie z. B. verfügbare Flächen und geothermische Restriktionen, werden Systemkennzahlen und Kostenparameter sowohl für ökologische Bewertungen als auch für erste Kostenabschätzungen oder detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalysen benötigt.

Zudem sind an der Planung geothermischer Systeme unterschiedliche Akteure beteiligt. In den meisten Fällen werden die Gebäudeenergiebedarfe von TGA-Planern berechnet und an die geologischen Fachplaner weitergegeben [VBI, 2012]. Anschließend nutzen die geologischen Fachplaner die Energie- und Leistungsbedarfe des Gebäudes in Kombination mit abgeschätzten Systemkennzahlen für die Dimensionierung der Wärmequellenanlage und beauftragen ein Bohrunternehmen für die Abteufung der Bohrungen und die Einbringung der Erdwärmesonden. Auf der Gebäudeseite schließen letztendlich Fachkräfte des Heizungshandwerks die Wärmepumpenanlage an die geothermische Quellenanlage an und nehmen die Anlage in Betrieb. Die planungsrelevanten Informationen und Systemkennzahlen sowie deren Zusammenhänge werden im Folgenden näher analysiert.

2.5.1. Gebäudekennwerte

Für die Planung von geothermischen Wärmepumpensystemen werden Gebäudeenergiebedarfe bzw. -verbräuche für Heizung, TWW und Kühlung benötigt. Für Neubauten oder Gebäude, bei denen wenige Informationen vorhanden sind, werden Energiebedarfe auf Grundlage von Randbedingungen und Annahmen berechnet oder anhand von Schätzungen ermittelt. Bei Bestandsgebäuden können i. d. R. die gemessenen Jahresverbräuche von Wärme, Strom, Gas oder Öl direkt genutzt bzw. in Energiemengen umgerechnet werden.

Die Energiebedarfe für Heizung, TWW und Kühlung werden i. d. R. nach der Norm DIN V 18599 berechnet. Die Nutzenergiebedarfe für Heizung und Kühlung können nach dem Monatsbilanzverfahren als monatliche Werte unter Berücksichtigung von Wärmequellen und -senken sowie des monatlichen Ausnutzungsgrads der Wärmegewinne berechnet werden [DIN V 18599, 2018a]. Innerhalb der Berechnung werden u. a. die solare Einstrahlung, interne Lasten, die Strahlungsabsorption und Wärmeabstrahlung an der Gebäudehülle sowie Transmission und Lüftung berücksichtigt [DIN V 18599, 2018a]. Der Nutzwärmebedarf für TWW wird anhand des gezapften Wasservolumens sowie den Temperaturen des Kaltwasserzulaufs und TWW-Auslaufs berechnet [DIN V 18599, 2018c]. Alternativ kann der TWW-Bedarf speziell für Wärmepumpenheizungsanlagen mit Zapfprofilen aus DIN EN 15450 [2007] ermittelt werden [Dimplex, 2015; ELTRON, 2019; Viessmann, 2011].

Bis zum 31. Dezember 2023 kann neben der Berechnung nach DIN V 18599 auch das Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 für Wohngebäude ohne Kühlbedarf genutzt werden [BMJ, 2022]. Das Verfahren entspricht der Berechnungsweise der DIN V 18599 mit dem Unterschied, dass keine Kühlung berücksichtigt wird. Ab 2024 ist für das Monatsbilanzverfahren ausschließlich die Norm DIN V 18599 zu verwenden.

Die Wärmeenergie, die die Wärmepumpe zur Raumheizung und TWE bereitstellen muss, ist als Erzeugernutzwärmeabgabe definiert. Sie entspricht der Nutzenergie zuzüglich Heizungsübergabeverluste, Verluste des Heizungs- und TWW-Verteilsystems sowie Verluste von Puffer- und TWW-Speichern (siehe [DIN V 18599, 2018b]).

Zur Berechnung des Endenergiebedarfs müssen darüber hinaus die Erzeugerverluste berücksichtigt werden. Der Endenergiebedarf und dessen Verteilung über das Jahr sind entscheidende Kenngrößen für die Dimensionierung. Die Energiebedarfe werden i. d. R. als monatliche oder jährliche Werte in der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme genutzt. Neben der Berechnung können die Energiebedarfe auch mit thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen ermittelt werden. Auf gängige, in der Praxis verwendete Gebäudesimulationsprogramme wird in Abschnitt 2.8.1 eingegangen.

Durch eine energetische Gebäudesanierung können u. a. die Transmissionswärmeverluste und Infiltration reduziert (beispielsweise durch die Dämmung der Gebäudehülle oder den Austausch der Fenster) und in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens der Energieverbrauch für Raumheizungszwecke gesenkt werden. Dadurch kann insbesondere der im unsanierten Gebäude gemessene Energieverbrauch für Raumheizung nur für die Planung des zukünftigen

Energiesystems genutzt werden, wenn er um die zu erwartenden Einsparungen reduziert wird. Können die Einsparungen nicht abgeschätzt werden, sind Energiebedarfswerte für das Gebäude im sanierten Zustand zu berechnen bzw. zu simulieren.

Anhand des Endenergiebedarfs und energieträgerspezifischer Primärenergiefaktoren kann der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf des Gebäudes berechnet werden. Der Primärenergiebedarf wird häufig für Systemvergleiche und Machbarkeitsstudien genutzt.

Neben den Energiebedarfen wird die Heizlast bzw. die maximale Kühllast des Gebäudes zur Dimensionierung der Wärmepumpe benötigt. Die Normheizlast wird nach DIN EN 12831 für den kritischsten Auslegungstag unter Nutzung der entsprechenden Norm-Außentemperatur des Bezugsstandorts berechnet und beinhaltet Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie zusätzliche Aufheizleistungen nach Temperaturabsenkungen im Raum [DIN EN 12831, 2017]. Die maximale Kühllast kann mithilfe der Richtlinie VDI 2078 anhand eines Abschätzverfahrens in Anlehnung an DIN V 18599-2 vorkonzeptioniert bzw. unter Berücksichtigung von u. a. Klimazonen, Wetterdaten der Testreferenzjahre (englisch: Test Reference Year (TRY)), solarer Einstrahlung sowie inneren Wärmequellen und -senken durch ein in der VDI 2078 beschriebenes EDV-Verfahren berechnet werden [VDI 2078, 2015].

Die Energiebedarfe, Gebäudelasten und Nennleistungen der Wärmeerzeuger werden oft von Ingenieurbüros mittels der oben genannten Normen oder Richtlinien berechnet. Teils werden jedoch auch grobe flächen- oder gebäudespezifische Kennwerte aus Erfahrungswerten abgeschätzt oder aus der Literatur bezogen. Im Folgenden wird auf den Dimensionierungsprozess von Wärmepumpensystemen eingegangen, die für Heizzwecke und die TWE eingesetzt werden.

2.5.2. Wärmepumpe

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Größen kann die erforderliche Wärmepumpenleistung für Heizungsanlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern in Anlehnung an VDI 4645 [2018] mittels Formel 2.7 berechnet werden:

$$\dot{Q}_{WP,\mathrm{erf}} = \frac{24\,\mathrm{h} \cdot \dot{Q}_{\mathrm{HL}} + Q_{TWW,d} + Q_{Sonst}}{24\,\mathrm{h} - \sum t_{Sperr}} \tag{2.7}$$

Neben der Normheizlast nach DIN EN 12831 ($\dot{Q}_{\mathrm{HL}}$), dem Tagesenergiebedarf für TWW ($Q_{TWW,d}$) und sonstigen Tagesenergiebedarfen (Q_{Sonst}) für z. B. Schwimmbäder, wird auch die tägliche Sperrdauer der Wärmepumpe (t_{Sperr}) berücksichtigt. Beim Bezug von vergünstigten Wärmepumpenstromtarifen kann das Elektrizitätsversorgungsunternehmen zur Netzregulierung die Stromversorgung für steuerbare Verbrauchseinrichtungen zu bestimmten Zeiten unterbrechen [EnWG, 2005]. Die Bundestarifordnung Elektrizität (BTOElt) von 1989 regelte dafür die Sperrzeiten. Die Wärmepumpe konnte dabei maximal dreimal für höchstens

zwei Stunden am Stück gesperrt sein, sodass t_{Sperr} maximal sechs Stunden beträgt [BTOElt, 1989]. Zwischen den Sperrzeiten muss eine mindestens gleich große Zeit ohne Sperrung gewährleistet sein [BTOElt, 1989; Buderus, 2022]. Mittlerweile regelt das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in §14a die Vorgaben an Betreiber von Elektrizitätsverteilernetzen und Lieferanten für Netzentgeltreduzierungen im Falle von netzorientierten Steuerungen [EnWG, 2005]. Darin sind keine expliziten Angaben zu Sperrzeiten mehr enthalten. Somit können Energieversorgungsunternehmen die Sperrzeiten bei vergünstigten Wärmepumpenstromtarifen individuell festsetzen.

Zur korrekten Dimensionierung einer monovalent betriebenen Wärmepumpe wählt der Planer ein Wärmepumpengerät mit einer Nennleistung aus, die mindestens so groß ist wie die berechnete erforderliche Wärmepumpenleistung. Die Wärmepumpennennleistung wird anhand der Wärmequellenaustritts- und Heizungsvorlauftemperatur angegeben. Für Sole-Wasser-Wärmepumpen wird i. d. R. eine Wärmequellenaustrittstemperatur von 0 °C und eine Heizungsvorlauftemperatur von 35 °C angesetzt (B0/W35).

Die Normheizlast berücksichtigt keine inneren und solaren Wärmegewinne, sondern bildet einen Extremfall der Dimensionierung ab. Da die Norm-Außentemperatur i. d. R. tiefer ist als die niedrigste auftretende Außenlufttemperatur am Standort, sind die meisten Heizungssysteme überdimensioniert. Darüber hinaus stellt die Berücksichtigung von Sperrzeiten einen zusätzlichen Aufschlag dar. Eine Überdimensionierung der Anlagen führt zu steigenden Investitionskosten und insbesondere bei taktenden Wärmepumpen zu einem schlechteren Betriebsverhalten der Wärmepumpe. Zur Reduzierung der erforderlichen Wärmepumpenleistung wird in DIN EN 15450 [2007] ein Auslegungsfaktor auf die Heizlast in Abhängigkeit von der Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes eingeführt, der die Heizlast mit steigender Wärmespeicherkapazität des Gebäudes bis auf 90 Prozent reduziert. Die Installation einer kleiner dimensionierten Wärmepumpe als alleiniger Wärmeerzeuger birgt, im Vergleich zur Nennleistung nach den Richtlinien, technische und rechtliche Risiken [Koenigsdorff, 2011].

Durch den Einsatz eines zweiten Wärmeerzeugers (bivalenter Betrieb) kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden, ohne die technischen Regeln zu verletzen [Koenigsdorff, 2011]. Bei bivalenten geothermischen Wärmepumpensystemen wird die Wärmepumpe i. d. R. für die Grundlastabdeckung [Koenigsdorff, 2011] und der zweite Wärmeerzeuger für die Spitzenlastdeckung eingesetzt. Zusammen mit dem zusätzlichen Wärmeerzeuger wird die Wärmepumpe entweder monoenergetisch, bivalent-parallel, bivalent-teilparallel oder bivalent-alternativ betrieben. Beim monoenergetischen Betrieb wird neben der Wärmepumpe auch der zweite Wärmeerzeuger elektrisch betrieben. Dabei deckt i. d. R. ein Heizstab die Spitzenlasten ab. Monoenergetisch betriebene Wärmepumpen können bei einer geringen Heizlast und einem geringen Energiebedarf (z. B. in Einfamilien- bzw. kleinen Mehrfamilienhäusern) sowie einem kleinen Deckungsanteil des Heizstabes am Energiebedarf kleiner dimensioniert und somit wirtschaftlicher und ökologischer betrieben werden als monovalente Systeme (siehe [Weck-Ponten et al., 2021b]). In Abbildung 2.8 ist der bivalent-parallele Betrieb einer Sole-Wasser-Wärmepumpe schematisch dargestellt.

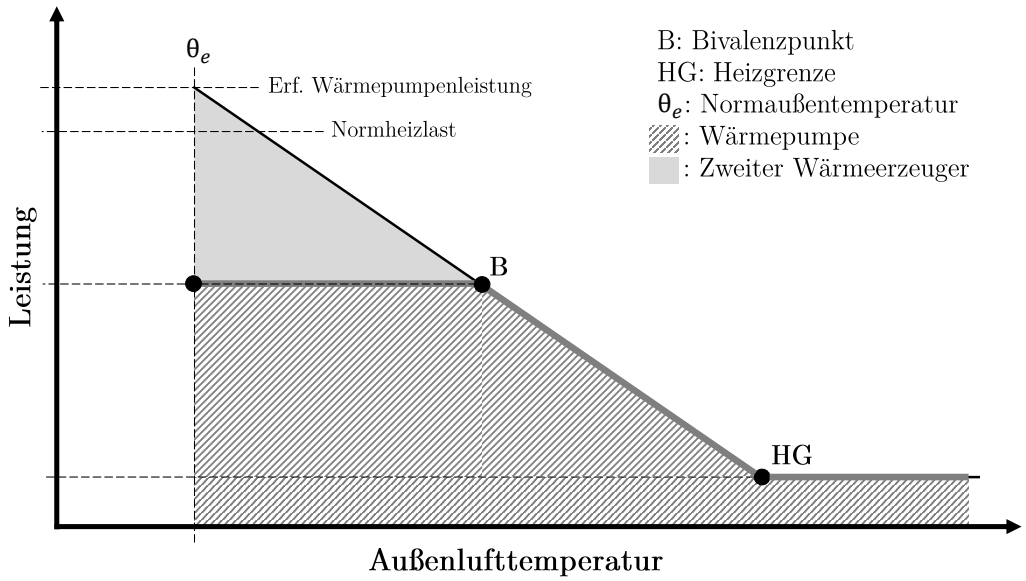


Abb. 2.8.: Dimensionierungsdiagramm der bivalent-parallelen Betriebsweise

Die nach VDI 4645 berechnete erforderliche Wärmepumpenleistung stellt die maximale Heizleistung des Systems bei der Normaußentemperatur dar. Bei Außenlufttemperaturen, die größer sind als die Heizgrenztemperatur, fällt kein Gebäudeheizwärmeleistungsbedarf, sondern ausschließlich der von der Außenlufttemperatur unabhängige TWW-Bedarf als Grundlast an. Zwischen der Heizgrenz- und Normaußenlufttemperatur wird ein linear steigender Verlauf der Gebäudeheizwärmelast mit sinkender Außenlufttemperatur angenommen. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Wärmepumpennennleistung ergibt den Bivalenzpunkt des Systems. Ab dem Bivalenzpunkt wird der zweite Wärmeerzeuger zugeschaltet, sodass die Wärmepumpe und der zweite Wärmeerzeuger parallel in Betrieb sind, solange die Außenlufttemperatur niedriger ist als die Bivalenztemperatur. In diesen Fällen wird vereinfacht ein konstanter Verlauf der Wärmepumpenheizleistung angesetzt.

Mit andauerndem Wärmeentzug aus dem Untergrund sinkt die Quellentemperatur ab, sodass am Ende der Heizperiode die Heizleistung der Wärmepumpe kleiner ist als zu Beginn. Da hohe Gebäudeheizlasten und geringe Außenlufttemperaturen jedoch auch zu Beginn oder in der Mitte der Heizperiode auftreten können und die Bodentemperatur nur teilweise von der Außenlufttemperatur abhängt (vgl. Abschnitt 2.1), ist die Korrelation zwischen Heizlast und geothermischer Quellentemperatur nicht direkt gegeben und somit die Einbindung dieses Sachverhalts in das Dimensionierungsdiagramm geothermischer Wärmepumpensysteme nicht sinnvoll.

Bei der alternativen Betriebsweise wird die Wärmepumpe im Abschaltpunkt ausgeschaltet (vgl. Abbildung 2.9). Sinken die Außenlufttemperaturen unterhalb der Temperatur im Abschaltpunkt, ist der zweite Wärmeerzeuger im alleinigen Betrieb. Oberhalb der Abschalttemperatur deckt die Wärmepumpe die Gebäudelasten alleine.

Die bivalent-teilparallele Betriebsweise ist eine Kombination aus dem parallelen und alter-

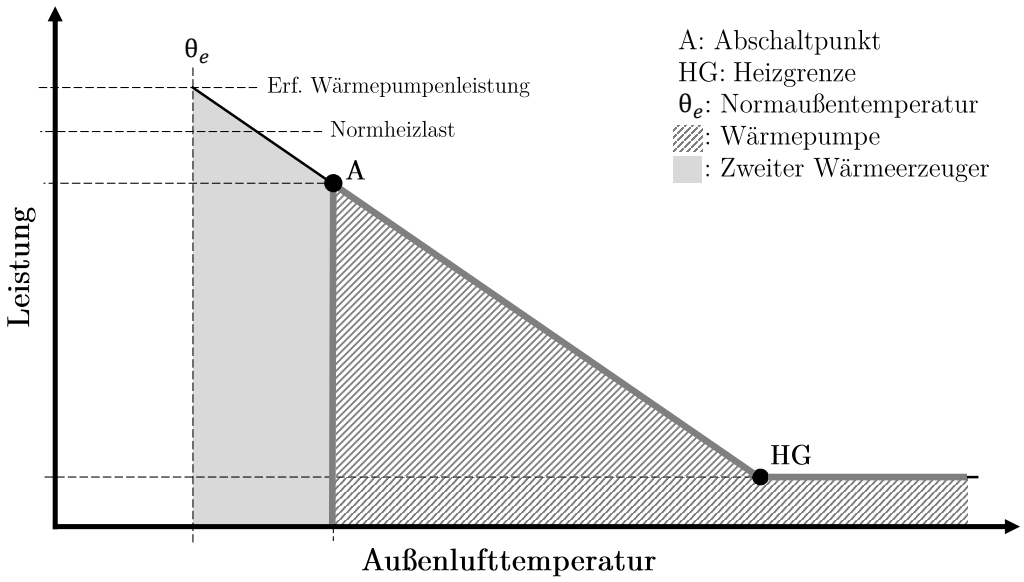


Abb. 2.9.: Dimensionierungsdiagramm der bivalent-alternativen Betriebsweise

nativen Betrieb. Ab dem Bivalenzpunkt wird zur Wärmepumpe der zweite Wärmeerzeuger zugeschaltet und ab dem Abschaltpunkt die Wärmepumpe ausgeschaltet, sodass der zweite Wärmeerzeuger alleine läuft (vgl. Abbildung 2.10).

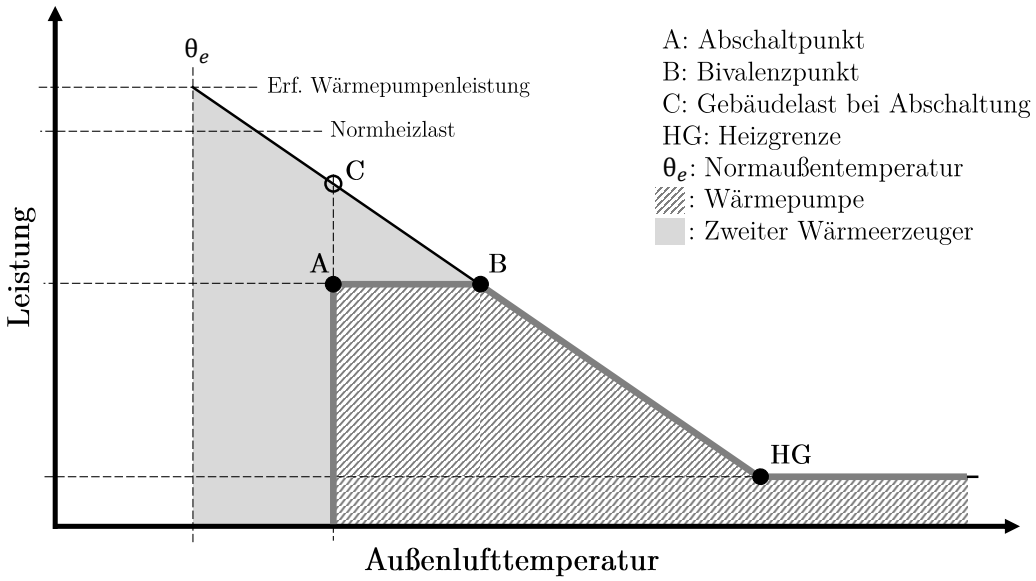


Abb. 2.10.: Dimensionierungsdiagramm der bivalent-teilparallelen Betriebsweise

Stehen stundengenaue Heizlasten über das komplette Jahr zur Verfügung, kann auch eine geordnete Jahresdauerlinie zur Dimensionierung des Energiesystems genutzt werden. In Abbildung 2.11 sind exemplarische, stundengenaue und nach der Größe geordnete Lasten für Heizung und TWW über das Jahr dargestellt. Geordnete Jahresdauerlinien kommen insbesondere bei größeren Gebäuden oder Quartiersbetrachtungen zum Einsatz.

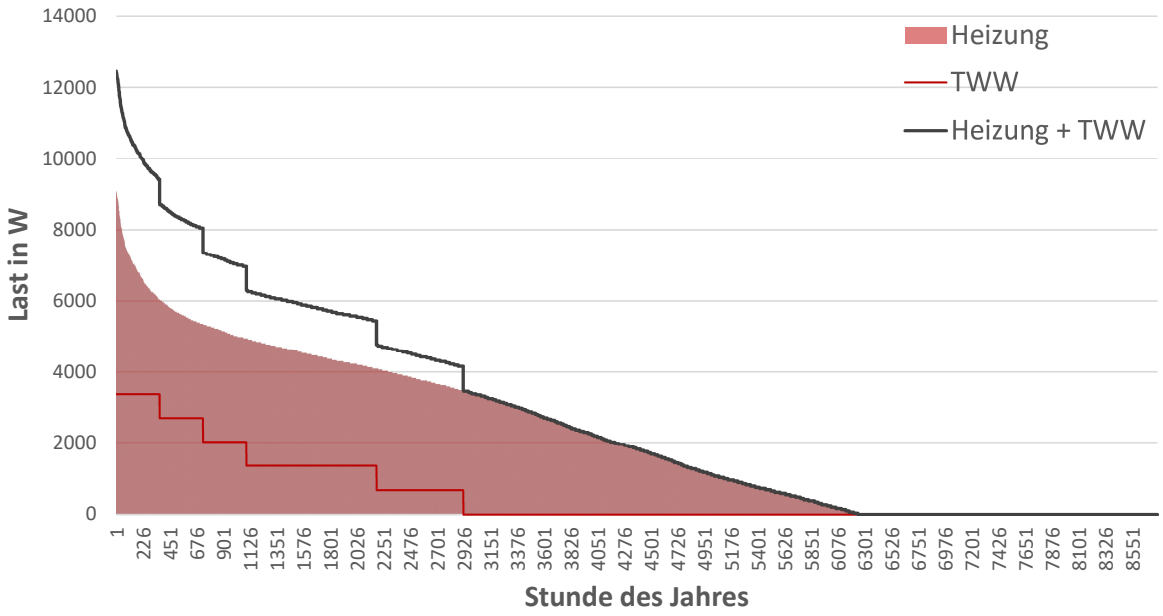


Abb. 2.11.: Beispielhafte geordnete Jahresdauerlinie für Heizung und TWW

Neben der erforderlichen Wärmepumpenleistung ist der SCOP für die Dimensionierung des Gesamtsystems einer der zentralen Parameter. Der SCOP von Sole-Wasser-Wärmepumpen hängt im Wesentlichen von der Dimensionierung, den Wärmequellenaustrittstemperaturen und den Systemvorlauftemperaturen für Raumheizung und TWE ab (vgl. Abschnitt 2.2). Je niedriger die Vorlauftemperaturen ausfallen, desto effizienter ist die Anlage.

2.5.3. Trinkwassergüte

Die Absenkung der TWW-Temperatur ist durch Randbedingungen der Trinkwasserhygiene beschränkt, um mikrobiologische Verunreinigungen, Biofilmbildung und Gesundheitsprobleme, beispielsweise aufgrund von Legionellenwachstum im TWW-System, zu vermeiden [Kistemann, 2017]. Für den Erhalt der Trinkwassergüte in den Prozessschritten der Trinkwassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung sind die Temperatur, der Wasseraustausch, die Durchströmung und das Nährstoffangebot wesentliche Einflussgrößen [Kistemann u. Bausch, 2019].

Bei der zentralen TWE wird zwischen Klein- und Großanlagen unterschieden. Als Kleinanlagen gelten Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Anlagen mit Trinkwassererwärmern mit weniger als 400 l Inhalt und weniger als drei Liter Wasservolumen in Rohrleitungen zwischen dem Trinkwassererwärmer und der Entnahmestelle [DVGW, 2004]. Alle sonstigen Gebäude wie z. B. Hotels oder Krankenhäuser, deren TWE-Anlage größere Wasservolumina aufweisen,

werden als Großanlagen bezeichnet [DVGW, 2004]. In Kleinanlagen mit Rohrleitungsinhalten von über drei Liter und in Großanlagen sind Zirkulationssysteme einzubauen [DVGW, 2004], welche die Temperatur in den Rohrleitungen auf einem konstant hohen Niveau halten. Dabei darf die Wassertemperatur in den Rohren um nicht mehr als fünf Kelvin unterhalb der Wassertemperatur am Speicheraustritt sinken [DVGW, 2004]. Die TWW-Temperatur am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers muss bei Großanlagen mindestens 60 °C betragen [DVGW, 2004]. Für Kleinanlagen wird nach DVGW [2004] eine TWW-Temperatur von 60 °C lediglich empfohlen. Betriebstemperaturen unterhalb von 50 °C sollen vermieden werden [DVGW, 2004]. Alternativen zur Gewährleistung der Trinkwassergüte durch thermische Desinfektion, bei der das gesamte System kurzzeitig auf über 70 °C erhitzt wird [DVGW, 2004], bieten Trinkwassermanagementsysteme sowie Verfahren wie beispielsweise Ultrafiltration oder eine optimierte Wasserdynamik [Kistemann u. Bausch, 2019; Schauer et al., 2019].

Neben dem DVGW-Arbeitsblatt W551 sind in der Norm DIN 1988-200 ebenfalls technische Regeln für Trinkwasserinstallationen aufgeführt. Mit der DIN 1988-200 wird bei zentralen Trinkwassererwärmern zusätzlich eine Anforderung an den Wasseraustausch innerhalb des Systems gestellt. Wird das Wasser innerhalb von drei Tagen vollständig ausgetauscht, ist eine TWW-Betriebstemperatur von mindestens 50 °C einzustellen [DIN 1988-200, 2012]. Andernfalls muss die Warmwassertemperatur am Austritt des Wassererwärmers mindestens 60 °C betragen [DIN 1988-200, 2012]. An dezentrale TWE über beispielsweise elektrische Durchlauferhitzer werden keine Anforderungen gestellt, wenn die 3-Liter-Regel eingehalten wird [DVGW, 2004].

2.5.4. Heizwärmeübergabesystem

Die Heizungsvorlauftemperatur ist maßgeblich von der Art und Ausführung des installierten Heizwärmeübergabesystems sowie von der energetischen Qualität der Gebäudehülle abhängig. Flächenheizungssysteme, wie z. B. Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen, sowie thermisch aktivierte Bauteilsysteme können aufgrund der großen Wärmeübertragungsfläche mit Vorlauftemperaturen um 35 °C betrieben werden. Im Gegensatz dazu benötigen Heizkörper häufig höhere Vorlauftemperaturen. Infolge einer energetischen Gebäudesanierung können bei der Weiternutzung des bestehenden Heizwärmeübergabesystems in den meisten Fällen die Heizungsvorlauftemperaturen der installierten, im Vergleich zum unsanierten Zustand überdimensionierten Heizkörper gesenkt werden. Der Austausch bestehender Heizkörper durch größere Varianten, Niedertemperaturheizkörper oder der Umbau zu einem Flächenheizungssystem bewirkt i. d. R. eine größere Absenkung der Heizungsvorlauftemperatur. Bei dem nachträglichen Einbau eines Flächenheizungssystems sind u. a. erforderliche Aufbauhöhen, Mindestraumhöhen und die Gebäudestatik zu beachten.

Generell ist der Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen in Bestandsgebäuden aufgrund der individuellen Randbedingungen bezüglich des Heizungs- und Wärmeübergabesystems, der energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie des Platzangebots auf dem Grundstück

zur Einbringung der geothermischen Quellenanlagen mit einem höheren Planungsaufwand verbunden. Die komplexe Planung, der eventuell anstehende Austausch bestehender Heizkörper zur Reduzierung der Heizungsvorlauftemperatur sowie daraus anfallende Mehrkosten stellen Hürden für den Einsatz geothermischer Wärmepumpensysteme im Gebäudebestand dar. Weitere Ausführungen zur Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme in Bestandsgebäuden sind in Kill [2019] enthalten.

2.5.5. Thermische Speicher

Weitere planungsrelevante Informationen im Gebäudebereich ergeben sich aus der Verwendung von thermischen Speichern. Thermische Speicher können im Wesentlichen zur Entkopplung von Wärmeanforderung und -erzeugung, zur hydraulischen Entkopplung von Erzeuger- und Verbraucherkreis, zur Laufzeitoptimierung, zur Gewährleistung eines Mindestvolumenstroms des Heizungssystems oder einer Mindestlaufzeit der Wärmepumpe sowie zur Überbrückung von Sperrzeiten genutzt werden [VDI 4645, 2018; Viessmann, 2011]. Angesichts der zukünftigen Entwicklung der Energieversorgung hin zu strombasierten Systemen mit einem hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien können thermische Speicher in Kombination mit Smart-Grid(SG)-fähigen Wärmepumpen auch zur Sektorkopplung und zum Ausgleich von Stromnetzschwankungen eingesetzt werden [Miara et al., 2011].

Im Allgemeinen wird zwischen Pufferspeichern zur Speicherung von Wärme für Heizungszwecke, TWW-Speichern zur Energiebevorratung für TWW-Anwendungen sowie Kombispeichern unterschieden. Kombispeicher als Tank-in-Tank Systeme sind für den Einsatz in Wärmepumpensystemen weniger geeignet [VDI 4645, 2018] und werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt. Die Puffer- und TWW-Speichervolumina hängen, neben den angesetzten Gebäudeenergiebedarfen, u. a. von den Systemtemperaturen sowie der Wärmespeicherkapazitäten des Gebäudes und des Heizwärmeübergabesystems ab. Die daraus resultierenden Zusammenhänge werden in Abschnitt 2.5.9 näher analysiert.

2.5.6. Weitere standortabhängige Parameter

Zudem beeinflussen objekt- und standortbezogene Randbedingungen die Planung. Dabei ist der Handlungsspielraum im Gebäudebestand durch die vorherrschenden Randbedingungen geringer als im Neubaubereich. Beispielsweise beeinflussen der verwendete Wärme- bzw. Kälteerzeuger, das Vorhandensein eines Gas- oder Wärmenetzes am Standort, das Platzangebot im Haus zur Installation der neuen Anlage, das Platzangebot auf dem Grundstück zur Erschließung erneuerbarer Energien, das verwendete und zukünftig gewünschte Heizwärmeübergabesystem, die energetische Qualität der Gebäudehülle im unsanierten Zustand sowie die geplante energetische Qualität nach einer Sanierung der Gebäudehülle die Entscheidung des Bauherren für oder gegen geothermische Wärmepumpensysteme im Bestand.

2.5.7. Geothermische Quellenanlagen und das Erdreich

Für die geothermische Quellenanlage und das umgebene Erdreich existieren zahlreiche Planungsrandbedingungen und Genehmigungsanforderungen. Im Folgenden wird auf planungsrelevante Informationen für Erdwärmesonden eingegangen. Der Antrags- und Genehmigungsprozess wird in Abschnitt 2.5.8 thematisiert.

In der Richtlinie VDI 4640 sind Randbedingungen für die thermische Nutzung des Untergrunds beschrieben und Tabellen mit überschlägigen Dimensionierungskennwerten für verschiedene Bodentypen und Wärmequellenanlagentypen enthalten. Die Tabellen können bei Kleinanlagen mit einer Wärmepumpennennheizleistung von bis zu 30 kW und Volllaststunden von 1.200 h bis 2.400 h für eine vereinfachte Abschätzung der maximal möglichen spezifischen Entzugsleistung des Wärmequellensystems herangezogen werden [VDI 4640, 2019]. Bei der Anwendung der Tabellen für Erdwärmesonden müssen zusätzlich die Sondeneigenschaften von Doppel-U-Sonden in annähernder Linienanordnung entsprechen und die geplanten Erdwärmesonden zwischen 50 m und 100 m lang sein [VDI 4640, 2019]. Darüber hinaus ist das Tabellenverfahren für maximal fünf gleichlange Erdwärmesonden mit Mindestabständen zwischen den Sonden von sechs Metern ausgelegt, bei denen keine thermischen Wechselwirkungen mit Nachbaranlagen zu erwarten sind [VDI 4640, 2019]. Die Tabellen fußen auf Berechnungen mit definierten Randbedingungen. Für Erdwärmesonden wurden beispielsweise eine mittlere Untergrundtemperatur über die Sondenlänge von 11 °C und eine minimale Temperatur des Fluids am Wärmepumpenaustritt von über 0 °C im Grundlastbetrieb angesetzt [VDI 4640, 2019]. Des Weiteren berücksichtigen die den Tabellen zugrundeliegenden Berechnungen nur konduktive und keine konvektiven Prozesse im Untergrund [VDI 4640, 2019].

Die maximal mögliche spezifische Entzugsleistung ist bei Erdwärmesonden auf deren Bohrtiefe bezogen und entspricht der Leistung, die aus dem Untergrund bei bestimmten Randbedingungen pro Meter Erdsondenlänge entzogen werden kann. Unter den vorgenannten Randbedingungen für Kleinanlagen wird die Erdwärmesondenlänge vereinfacht nach Formel 2.8 in Anlehnung an VDI 4640 [2019] berechnet:

$$l_{\mathrm{EWS}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{Verd}}}{n_{\mathrm{EWS}} \cdot \dot{q}_{\mathrm{EWS}}} \tag{2.8}$$

Die Länge einer Einzelsonde (l_{EWS}) hängt neben der spezifischen Entzugsleistung ($\dot{q}_{\mathrm{EWS}}$) von der Anzahl der geplanten Erdwärmesonden (n_{EWS}) und der Verdampferleistung der Wärmepumpe ($\dot{Q}_{\mathrm{Verd}}$) ab. Letztere wird aus der Differenz der Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe im Nennbetriebspunkt gebildet. $\dot{q}_{\mathrm{EWS}}$ kann für eine turbulente Strömung in der Erdwärmesonde tabellarisch, u. a. anhand der angesetzten Jahresvolllaststunden, der Anzahl der Erdwärmesonden und der gemittelten Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, ermittelt werden.

Die Jahresvolllaststunden sind als die berechnete Zeit definiert, für die die Wärmepumpe bei Nennleistung betrieben werden müsste, um die Jahresenergiemenge zu liefern, die die Wärmepumpe im realen Betrieb, einschließlich Stillstandszeiten und Teillastbetrieb, zur Verfügung stellen würde [VDI 4640, 2019]. Für die Bestimmung der Volllaststunden ist neben der Erzeugernutzwärmeabgabe der Wärmepumpe für Raumheizung auch diejenige zur TWE zu berücksichtigen [VDI 4640, 2019]. Wird die Anlage bivalent betrieben und somit die Wärmepumpe kleiner dimensioniert, erhöhen sich dadurch die Volllaststunden der Wärmepumpe [VDI 4640, 2019]. Die Volllaststunden werden auch als Vollbenutzungsstunden bezeichnet und anhand des Verhältnisses aus der Erzeugernutzwärmeabgabe der Wärmepumpe und ihrer Nennwärmeleistung berechnet (vgl. [Koenigsdorff, 2011]). Die tatsächlich gemessenen Betriebsstunden einer Wärmepumpe hängen u. a. von den bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes, den klimatischen Standortgegebenheiten, der Betriebsweise und der Regelung der Wärmepumpe, vom Einsatz thermischer Speicher und vom Nutzerverhalten ab und weichen i. d. R. von den berechneten Volllaststunden ab [Born et al., 2017].

Darüber hinaus sind in der Richtlinie VDI 4640 für Kleinstanlagen bis 8 kW Nennwärmeleistung und Erdwärmesondenlängen von 50 m bis 100 m überschlägige Dimensionierungsvorschläge in tabellarischer Form gegeben [VDI 4640, 2019].

In der Fachplanungspraxis werden für die Dimensionierung der geothermischen Quellenanlage i. d. R. Simulationen oder analytische Rechenverfahren eingesetzt und geologische Karten, webbasierte Geoportale oder auch Schichtprofile und TRT aus Erkundungsbohrungen zur Ermittlung von Bodenkennwerten genutzt, anstatt die Tabellenverfahren zu verwenden. Eine Erkundungsbohrung wird bei Anlagen mit einer Wärmenennleistung der Wärmepumpe von über 30 kW oder bei unklaren geologisch-hydrogeologischen Verhältnissen empfohlen [VDI 4640, 2019]. Rechen- und Simulationsverfahren sind nach VDI 4640 [2019] bei einer größeren Zahl von benachbarten Erdwärmesonden, bei Optimierungs- und Variantenrechnungen, bei geothermischen Anlagen mit Kühlanwendungen, bei projektierten Jahresvolllaststunden von über 2.400 h und bei Anlagen erforderlich, die die 30 kW-Grenze überschreiten.

Das Ziel der Dimensionierung von Erdwärmesonden ist die hinreichend genaue Abbildung der Temperaturen des in der Sonde strömenden Wärmeträgerfluids über einen Zeitraum von meist 50 Jahren, sodass vorgegebene Temperaturgrenzen überprüft werden können [VDI 4640, 2019]. Bezüglich der Temperaturgrenzen wird innerhalb der Richtlinie VDI 4640 zwischen den Einsatzbereichen Heizen und Kühlen sowie zwischen dem Monatsmittel und den Spitzenlasten differenziert. Für den Heizbetrieb wird empfohlen, die Eintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids in die Erdwärmesonde im Monatsmittel auf minimal 0 °C und bei Spitzenlast auf minimal −5 °C zu begrenzen [VDI 4640, 2019]. Im Kühlbetrieb soll eine Überschreitung der Eintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids in die Erdwärmesonde von 15 K im Monatsmittel und 20 K bei Spitzenlast im Vergleich zur ungestörten Untergrundtemperatur vermieden werden [VDI 4640, 2019]. Weitere Kriterien können u. a. die Frostgrenze des Wärmeträgerfluids in der Erdwärmesonde oder die Vermeidung von Vereisung um die Sonde herum sein, um beispielsweise Frostschäden an der Verfüllung zu vermeiden [Koenigsdorff, 2011].

Angestrebt wird eine langfristig ausgeglichene Energiebilanz des Bodens und ein stabiles Temperaturprofil über den Auslegungszeitraum [VBI, 2012]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Informationen über die hydrogeologischen Eigenschaften des Bodens notwendig. Das können u. a. die Bodenschichtarten, Schichtmächtigkeiten und Grundwasserverhältnisse sowie schichtspezifische Stoffeigenschaften wie die Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, der Feuchtegehalt, die Porosität und Permeabilität sein. Anhand dieser Größen können über ein Bodengutachten, einen TRT oder einen EGRT Parameter wie z. B. die effektive volumetrische Wärmekapazität, die effektive Wärmeleitfähigkeit, der effektive thermische Bohrlochwiderstand oder die spezifische Entzugsleistung des Standortes ermittelt werden. Liegen keine Bodengutachten vor oder sind keine Probebohrungen geplant, können manche Parameter wie z. B. die mittlere Wärmeleitfähigkeit aus Geoportalen bezogen werden. Der effektive Bohrlochwiderstand kann innerhalb des verwendeten Berechnungswerkzeugs u. a. anhand der Bohrlochgeometrie, der Sonden- und Verfüllmaterialien sowie dem Fluidvolumenstrom ermittelt werden [VDI 4640, 2019]. Der effektive Bohrlochwiderstand berücksichtigt die Wärmeübertragungsmechanismen innerhalb des Bohrlochs und beschreibt die Wärmeleistung pro Meter Sondentiefe und Kelvin Temperaturdifferenz zwischen dem Mittelwert der Sondenfluidtemperatur und der Erdreichtemperatur am Bohrlochrand [Koenigsdorff, 2011].

Weitere planungsrelevante Informationen bezüglich der geothermischen Quellenanlage sind die Stoffeigenschaften der Wärmeträgerflüssigkeit in der Sonde und die Charakteristik der Umwälzpumpe. Häufig ist die Soleumwälzpumpe in das Wärmepumpengerät integriert [Koenigsdorff, 2011]. Für eine gute Wärmeübertragung innerhalb der Sonde ist eine turbulente Strömung anzustreben. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Volumenstroms des Wärmequellensystems und zur Bemessung der Soleumwälzpumpe wird eine Druckverlustberechnung durchgeführt [Koenigsdorff, 2011].

Die durch die Nutzung von Erdwärmesonden resultierende Temperaturverteilung im Untergrund wird, neben den wetterinduzierten Einflüssen oberhalb der neutralen Zone, hauptsächlich durch die Wärmespeicherkapazität der Bodenschichten, Wärmeleitungs- und Konvektionsprozesse sowie die entzogene bzw. zugeführte Energiemenge über den Betrachtungszeitraum und die maximalen Spitzenlasten beeinflusst [Koenigsdorff, 2011]. Die Erdreichtemperatur wird im Heizbetrieb kontinuierlich abgesenkt und im Kühlbetrieb durch Wärmezufuhr erhöht. Zusätzlich wird der Untergrund durch solare Strahlung, Sickerwasser, Grundwasserströmungen und die Wärmeleitung angrenzender Gesteinsschichten natürlich regeneriert. Die Prozesse im Untergrund sind sehr träge, sodass im reinen Heizbetrieb die Bodentemperatur meist über Jahre abgesenkt wird bis ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist und sich das mittlere Bodentemperaturniveau nicht mehr ändert [Koenigsdorff, 2011]. Die Leistungsaufnahme bzw. -abgabe von Erdwärmesonden ist, neben der Wärmequelleneintrittstemperatur, dem Solevolumenstrom, den Wärmeleiteigenschaften des Verfüllmaterials und den Stoffeigenschaften des umliegenden Erdreichs, insbesondere von Grundwasserströmungen und den konvektiven Wärmeübertragungsmechanismen abhängig. Neben einem reinen Wärmeentzug bzw. einem reinen Wärmeeintrag kann der Untergrund auch als saisonaler Wärmespeicher genutzt werden. Für die Wärmespeicherung sind Grundwasserströmungen nachteilig, da die

eingespeicherte Energie im Untergrund durch die Strömung weggetragen wird. Eine Voraussetzung für die saisonale Wärmespeicherung sind Grundwasserfließgeschwindigkeiten von weniger als 0,05 m/d [VBI, 2012].

Darüber hinaus beeinflussen Grundwasserströmungen maßgeblich die Ausbreitung von Temperaturfahnen im Untergrund. Letztere sind entscheidend für die Überprüfung der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Erdwärmesonden und des Einflusses auf benachbarte Liegenschaften. Anhand von Simulationen können Temperaturfahnen dargestellt werden. Bei kleineren Anlagen werden aus Kostengründen i. d. R. keine Untergrundsimulationen eingesetzt, die Grundwasserströmungen berücksichtigen, sondern von den Bundesländern empfohlene statische Mindestabstände zu benachbarten Erdwärmesonden und Grundstücken genutzt. Die thermische Beeinflussung und Abstandsgrenzen sowie das daraus resultierende Platzangebot für Erdwärmesonden auf dem Grundstück sind die entscheidenden Planungskriterien für die Realisierbarkeit des Projektes. Die Abstandsregeln variieren in den unterschiedlichen Bundesländern (vgl. Tabelle 2.1) und sind Teil des Antrags- und Genehmigungsprozesses, der im Folgenden thematisiert wird.

2.5.8. Antrags- und Genehmigungsprozess

Einem flächendeckenden Ausbau geothermischer Wärmepumpensysteme steht, neben der hohen Planungskomplexität sowie hohen Investitionskosten und Strompreisen, die Komplexität der Antrags- und Genehmigungsverfahren gegenüber. Die wesentlichen gesetzlichen Regelungen werden durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), das Bundesberggesetz (BBergG) und das Geologiedatengesetz (GeolDG) vorgegeben. Die Umsetzung der Gesetze erfolgt durch länderspezifische und teils heterogene Verfahren [VDI 4640, 2021]. Im Folgenden wird auf die Gesetze vertieft eingegangen, die für die Nutzung von Erdwärmesonden zu berücksichtigen sind und die Dimensionierung geothermischer Wärmepumpen beeinflussen können.

Die Errichtung und der Betrieb von Erdwärmesondenanlagen bedürfen einer Anzeige oder einer wasserrechtlichen Erlaubnis bzw. Bewilligung [Eisele et al., 2019a]. Nach dem WHG sind Gewässer nachhaltig zu bewirtschaften sowie eine mögliche Grundwassergefährdung und eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften zu verhindern [BMJ, 2021b]. Grundwassergefährdungen können von oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen u. a. durch einen Kurzschluss von Grundwasserleitern und die Vermischung von Grundwässern unterschiedlicher Beschaffenheit in Folge der Bohrarbeiten sowie durch die Verwendung von wassergefährdenden Wärmeträgermedien ausgehen [Bockelmann et al., 2011; VDI 4640, 2021]. Ist eine wasserrechtliche Erlaubnis gefordert, entscheidet die Untere Wasserbehörde anhand des WHG und länderspezifischer Wassergesetze über die Bewilligung [VBI, 2012].

Länderspezifische Geoportale können den Antragsstellern Hilfestellungen in Form von Standortbeurteilungen liefern. Beispielsweise enthält der Geologie Viewer von Hessen hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilungen mit einer Einteilung in hydrogeologisch günstige und ungünstige sowie wasserwirtschaftlich ungünstige und unzulässige Gebiete

[HLNUG, 2022]. In hydrogeologisch ungünstigen Gebieten sind Einzelfallprüfungen notwendig und Erdwärmesonden sind teilweise nur mit weitergehenden Auflagen wie z. B. einer Bohrtiefenbeschränkung erlaubnisfähig [Rumohr et al., 2019]. Gründe für hydrogeologisch ungünstige Standorte können u. a. hohe Grundwasserdurchlässigkeiten, artesische Druckverhältnisse oder Gebiete mit quellfähigen Gesteinen sein [Rumohr et al., 2019]. In unzulässigen Gebieten ist aufgrund der wasserwirtschaftlichen Beurteilung eine geothermische Nutzung mit Erdwärmesonden generell ausgeschlossen [Rumohr et al., 2019]. Wasserwirtschaftlich unzulässige Gebiete können u. a. Grundwasser- und Heilquellenschutzgebiete sowie Einzugsgebiete von Trinkwassergewinnungsanlagen sein [BMJ, 2021b; VDI 4640, 2021]. In Hessen sind beispielsweise Erdwärmesonden in den Wasserschutzgebieten I, II, III und IIIA sowie in Heilquellenschutzgebieten II, III, III/1 und A unzulässig [HLNUG, 2022; Rumohr et al., 2019]. In Wasserschutzgebieten der Kategorie IIIB und in Heilquellenschutzgebieten der Kategorie III/2 sind Erdwärmesonden als ungünstig eingestuft [HLNUG, 2022; Rumohr et al., 2019]. Die Anforderungen des Gewässerschutzes gelten in Hessen für Erdwärmesondenanlagen, jedoch nicht für Erdwärmekollektoren, die mindestens einen Meter über dem höchsten Grundwasserstand liegen sowie Erdwärmekörbe oder sonstige geothermische Quellenanlagen mit einer maximalen Einbautiefe von bis zu drei Metern [Rumohr et al., 2019]. Zusätzlich entfällt für Erdwärmekollektoren in Hessen die hydrogeologische Beurteilung [Rumohr et al., 2019].

Das WHG wird in den Bundesländern durch die jeweiligen Landeswassergesetze umgesetzt. Dadurch können innerhalb Deutschlands regionale Unterschiede bei der Genehmigung von Erdwärmesondenanlagen auftreten. In Bayern gibt es beispielsweise viele Gebiete, in denen Erdwärmesonden, u. a. wegen Bereichen mit gespannten Grundwasserleitern, Karstgebieten, der Durchteufung von stockwerktrennenden Schichten oder der Erschließung tieferer Stockwerke, auch außerhalb von Wasserschutzgebieten nicht erlaubt sind (siehe [Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022]) oder Bohrtiefenbegrenzungen bestehen [BLU, 2012; BWP, 2012]. In einigen Regionen Bayerns werden Bohrtiefen von maximal 30 m genehmigt [Jochum et al., 2017]. Zusätzlich kann in wasserrechtlich sensiblen Gebieten länderübergreifend ein Betrieb der Wärmequellenanlage mit reinem Wasser und Temperaturen von durchgehend über 0 °C gefordert werden [Koenigsdorff, 2011].

Die in Erdwärmesonden und anderen oberflächennahen Wärmequellenanlagen zu verwendenden Wärmeträgermedien werden in der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) entweder als nicht wassergefährdend oder nach den Wassergefährdungsklassen (WGK) 1 bis 3 von schwach wassergefährdend über deutlich wassergefährdend bis stark wassergefährdend klassifiziert [BMJ, 2020b]. Erdwärmesonden dürfen nur mit reinem Wasser sowie nicht wassergefährdenden Gemischen oder Gemischen der WGK 1 betrieben werden [VDI 4640, 2021]. Die gängigen am Markt verfügbaren Wärmeträgerfluide mit Frostschutzwirkung werden in den üblichen Mischungsverhältnissen der WGK 1 zugeordnet, sodass deren Gebrauch als unkritisch einzustufen ist [VBI, 2012]. In der Praxis werden bei Erdwärmesondenanlagen, die mit glykolbasierten Wärmeträgermedien betrieben werden und nach dem Stand der Technik ausgeführt sind, durch §35 der AwSV Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen mit einer Abschaltfunktion der Soleumwälzpumpen und Alarmge-

bung für den Fall von Leckagen gefordert [Walker-Hertkorn u. Kuntz, 2021]. Darüber hinaus werden durch §35 der AwSV weitere Anforderungen an Materialien sowie die Installation und Inbetriebnahme von Erdwärmesonden geregelt, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Für geothermische Anlagen, in denen Wasser oder nicht wassergefährdende Stoffe verwendet werden, gilt die AwSV nicht, sondern die allgemeinen Sorgfaltspflichten nach WHG [Eisele et al., 2019a].

Darüber hinaus dürfen geothermische Anlagen keine signifikanten thermischen Veränderungen des Grundwassers induzieren [Eisele et al., 2019a]. Bezüglich der thermischen Veränderungen des Grundwassers empfiehlt die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), dass die Grundwassertemperatur im Vergleich zur ungestörten Erdreichtemperatur maximal um sechs Kelvin schwanken und nicht unterhalb von 4 °C absinken oder 20 °C übersteigen darf [Eisele et al., 2019a].

Neben wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Randbedingungen beinhalten Standortbewertungen zusätzlich Untersuchungen zu Altlasten, Kampfmitteln und Verunreinigungen im Untergrund, Untersuchungen zu unterirdischen Bauwerken und Kabeltrassen sowie zu oberirdischen Hindernissen und zur Befahrbarkeit des Standortes [VDI 4640, 2021].

Unabhängig vom wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren ist für jedes Vorhaben mit Erdwärmesonden zudem zu prüfen, ob bergrechtliche Belange betroffen sein können. Erdwärme gilt in Deutschland nach dem BBergG als ein bergfreier Bodenschatz und damit nicht als Eigentum des Grundstückbesitzers [BMJ, 2021a]. Dadurch darf Erdwärme in Deutschland nur mit entsprechenden Bergbauberechtigungen aufgesucht oder gewonnen werden [VDI 4640, 2021]. Erdwärmesondenanlagen, bei denen die gewonnene Wärme ausschließlich auf dem Grundstück oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung verwendet wird, sind von der Gewinnung ausgenommen [BMJ, 2021a]. Die rechtliche Auslegung dieses Ausnahmetatbestands wird in den verschiedenen Bundesländern unterschiedlich interpretiert, sodass die landesrechtlichen Regelungen zu erfragen und anzuwenden sind [VDI 4640, 2021]. Bei Erdwärmesonden, die mehr als 100 m tief in den Boden eindringen und Anlagen, in denen der Ausnahmetatbestand nicht greift, ist das BBergG zu beachten und somit für die Gewinnung eine bergrechtliche Bewilligung bei der zuständigen Bergbehörde zu beantragen, die Bohrung anzuzeigen und für die Erteilung der Gewinnungsberechtigung u. U. ein Betriebsplan vorzulegen [BMJ, 2021a; VDI 4640, 2021]. Diese Regelung impliziert, dass für alle anderen oberflächennahen geothermischen Anlagen die Regelungen des BBergG nicht oder nur eingeschränkt gelten. Aufgrund der 100-Meter-Grenze des BBergG werden Erdwärmesonden in Deutschland meist nicht tiefer als 100 m ausgeführt (vgl. [Bockelmann et al., 2011]). In Folge eines Rechtsgutachtens wird in Hessen die Nutzung oberflächennaher Geothermie mithilfe von Wärmepumpen seit Januar 2022 nicht mehr als Erdwärme im Sinne des BBergG angesehen [LEA, 2022]. Daraus könnten Vereinfachungen für das Antrags- und Genehmigungsverfahren resultieren.

Über die Anzeigepflicht des BBergG hinausgehend sind in Deutschland bundesländerübergreifend alle Bohrungen für Erdwärmenutzungen vor Ausführungsbeginn beim jeweiligen Geologischen Landesamt und bei der Unteren Wasserbehörde anzuzeigen [VBI, 2012]. Die

Pflicht, geologische Daten wie z. B. Schichtenverzeichnisse, Angaben zum Bohrverfahren, Probenbeschreibungen und Ergebnisse von Bohrlochmessungen an die zuständigen Behörden zu übermitteln und zu veröffentlichen, wird durch das GeolDG geregelt [BMJ, 2020a]. Dadurch werden Daten aus geologischen Untersuchungen an zentraler Stelle gesammelt und u. a. für die Planung, Genehmigung und Beantragung von geothermischen Anlagen zur Verfügung gestellt. Das Gesetz ist zum 19.06.2020 in Kraft getreten und ersetzt das Lagerstättengesetz [BMJ, 2020a]. Die vollständige oder teilweise Anwendung des Gesetztes obliegt den einzelnen Bundesländern [BMJ, 2020a]. Zusätzlich können die Länder festlegen, dass die Regelungen des GeolDG für Bohrungen bis zu zehn Meter Tiefe nicht angewendet werden [BMJ, 2020a].

Geothermische Systeme weisen aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Grundwasserschutz, Geologie, Hydrologie, Heizungstechnik und Nachbarschaftsrecht einen hohen Planungs- und Genehmigungsaufwand auf. Bei der Planung geothermischer Systeme sind thermische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Wärmequellenanlagen und Auswirkungen auf das Temperaturniveau im Untergrund zu berücksichtigen. In manchen Bundesländern sind geothermische Anlagen so zu dimensionieren, dass dem Nachbargrundstück möglichst keine Wärme entzogen wird. Um den Genehmigungsaufwand zu reduzieren, werden in Deutschland meist für Kleinanlagen bis 30 kW thermische Auswirkungen auf Nachbargrundstücke sowie Wechselwirkungen geothermischer Anlagen untereinander über bundesländerspezifische Abstandsempfehlungen erfasst. Die Informationen zu Mindestabständen sind in Leitfäden oder Merkblättern der einzelnen Bundesländer enthalten und häufig auf Empfehlungen der LAWA von 2011 begründet [Rumohr, 2017]. In den LAWA-Empfehlungen von 2011 werden Abstände zu benachbarten Erdwärmesonden von mindestens zehn Metern und zur Grundstücksgrenze von fünf Metern empfohlen [Pasler et al., 2011]. Die Richtlinie VDI 4640-1 empfiehlt ebenfalls einen Mindestabstand zu benachbarten Erdwärmesonden von zehn Metern [VDI 4640, 2021]. Bezüglich des Mindestabstands zur Grundstücksgrenze wird in der VDI 4640-1 kein Pauschalwert empfohlen, sondern auf mögliche kleinere Abstände als fünf Meter bei einer abgestimmten Planung zwischen Fachplanern und Behörden verwiesen [VDI 4640, 2021]. Die aktuellen LAWA-Empfehlungen von 2019 geben keine fixen Mindestabstände mehr an (vgl. [Eisele et al., 2019a]). Die empfohlenen bzw. vorgeschriebenen Mindestabstände der Bundesländer sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Weitere Abstandsempfehlungen oder Randbedingungen, die für die Abstandsempfehlungen gelten, sind in Tabelle A.1 enthalten.

Der überwiegende Teil der Bundesländer verwendet die LAWA-Abstandsempfehlung von fünf Metern zur Grundstücksgrenze. Bayern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz empfehlen hingegen kleinere Abstände zur Grundstücksgrenze von drei Metern. Schleswig-Holstein empfiehlt einen Abstand zur Grundstücksgrenze von fünf bis sechs Metern. In den Leitfäden von Baden-Württemberg, Berlin und Brandenburg werden keine direkten Angaben zu Mindestabständen gemacht. In Baden-Württemberg wird der halbe Mindestabstand zweier benachbarter Erdwärmesonden als Abstand zur Grundstücksgrenze vorgegeben, wenn keine Nachbarsonden vorhanden sind und die Bohrtiefen nicht 100 m übersteigen [UMBWL, 2018]. Aus dem Sondenmindestabstand von zehn Metern wird somit ein Wert von fünf Metern

Tab. 2.1.: Abstandsempfehlungen der Bundesländer zur Grundstücksgrenze bzw. zu Erdwärmesonden auf einem Nachbargrundstück sowie Empfehlungen der VDI 4640-1 und der LAWA (in Anlehnung an Rumohr [2017], aktualisiert und erweitert)

Bundesland / Literaturquelle	Mindestabstand zur Grundstücksgrenze	Mindestabstand zu Nachbaranlagen
Baden-Württemberg [UMBW, 2005; UMBWL, 2018]	(3 m bzw. 5 m)	10 m
Bayern [BLU, 2012]	> 3 m	> 6 m
Berlin [UVK, 2019]	–	10 m
Brandenburg [ETI, 2009]	–	5 m (BT: bis 50 m) bzw. 6 m (BT: > 50 m)
Bremen [SUBV, 2022]	5 m	–
Hamburg [BUE, 2012]	5 m	–
Hessen [Rumohr et al., 2019]	5 m	10 m
Mecklenburg-Vorpommern [Obst et al., 2015]	5 m (ES)	–
Niedersachsen [Ast et al., 2012]	5 m (SS)	10 m
Nordrhein-Westfalen [Eisele et al., 2019b]	3 m	6 m (BT: > 50 m)
Rheinland-Pfalz [Hohberger et al., 2012]	3 m	6 m
Saarland [Maurer et al., 2008]	5 m	–
Sachsen [LfULG, 2014]	5 m	–
Sachsen-Anhalt [Häntze, 2012]	5 m	–
Schleswig-Holstein [LLUR, 2011]	5 m bzw. 6 m	10 m
Thüringen [TLW, 2013]	5 m	–
[VDI 4640, 2021]	–	10 m
[Pasler et al., 2011]	5 m	10 m
[Eisele et al., 2019a]	–	–

ES = Einzelsonde; BT = Bohrtiefe; SS = Schrägsonde

abgeleitet. Zusätzlich ist in UMBWL [2018] ein beispielhafter Abstand von drei Metern aufgeführt. Die Abstandsempfehlungen zur Grundstücksgrenze von Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen sind auf Einzelsonden bzw. Schrägsonden begrenzt. In Hessen, Thüringen, Rheinland-Pfalz und im Saarland sind neben wasserrechtlichen auch bergrechtliche Vorgaben

bezüglich des Mindestabstandes zur Grundstücksgrenze einzuhalten [Rumohr, 2017].

Bezüglich der Abstände zu Nachbarsonden folgen Baden-Württemberg, Berlin, Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein der LAWA-Empfehlung aus 2011 von zehn Metern. Bayern, Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz geben kleinere Mindestabstände zu Nachbarsonden, teilweise in Abhängigkeit von der Bohrtiefe, an. In den Leitfäden von Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen werden keine Angaben bezüglich Mindestabständen zu Erdwärmesonden auf Nachbargrundstücken gemacht.

Darüber hinaus wird in Schleswig-Holstein bei einer Vielzahl benachbarter Erdwärmesondenanlagen in Wohngebieten die Ermittlung der thermischen Beeinflussung der Erdwärmesonden untereinander unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse empfohlen, wenn die gesamte Nennheizleistung der Anlagen über 30 kW beträgt [LLUR, 2011].

Nach Rumohr [2017] und Poppei et al. [2017] können fixe Abstandsregeln eine thermische Beeinflussung nicht grundsätzlich verhindern bzw. ausreichend abbilden. Innerhalb einer Studie der Stadt Zürich [Poppei et al., 2017] wurde aufgrund einer hohen Erdwärmesondeninstallationsdichte und den sich dadurch ergebenen thermischen Wechselwirkungen eine vereinfachte Rechenmethode zur Ermittlung von Abstandsgrenzen einer neuen Erdwärmesondenanlage zu bestehenden benachbarten Erdwärmesonden erarbeitet. Zusätzlich wurden in Poppei et al. [2017] Maßnahmen für die Kompensation der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Systemen mit kleinen Sondenabständen empfohlen. In diesen Fällen sollen zusätzliche Erdwärmesonden installiert oder der Boden durch geeignete Maßnahmen regeneriert werden [Poppei et al., 2017]. Grundwasserströmungen werden innerhalb der Rechenmethode nicht berücksichtigt. Des Weiteren kann die Rechenmethode keine Einflüsse von mehr als einer zukünftig installierten Anlage abbilden [Poppei et al., 2017].

Nach Poppei et al. [2017] muss für eine intensive Nutzung des geothermischen Untergrunds aufgrund der Ausbreitung der Temperaturfahnen bei örtlichen Häufungen von Erdwärmesonden grundsätzlich eine bestimmte gegenseitige Beeinflussung toleriert werden. Die Grenze, ab der die thermische Beeinflussung zu groß ist, sollte möglichst über einheitliche Regelungen festgelegt und durch Simulationen nachgewiesen werden. Jedoch wird in der Praxis die gegenseitige thermische Beeinflussung von Erdwärmesonden aufgrund von fehlenden praxistauglichen Dimensionierungswerkzeugen und fehlenden Informationen selten überprüft [Poppei et al., 2017]. In Abbildung 2.12 sind exemplarische, von Erdwärmesonden und der Grundwasserströmung induzierte Temperaturfahnen im Untergrund dargestellt, die über Grundstücksgrenzen hinausragen.

In Poppei et al. [2019] wurde, u. a. auf der Grundlage der Studie von Poppei et al. [2017] und anhand von Untergrundsimulationen mit der Software EED, ein grundstücksflächenbezogener Wärmeentzug definiert, mit dem die thermische Beeinflussung des Untergrunds durch zukünftige Nachbarsonden und der erforderliche thermische Regenerationsbedarf des Bodens für verschiedene Wärmebedarfszonen abgeschätzt werden kann. Die Berechnung des

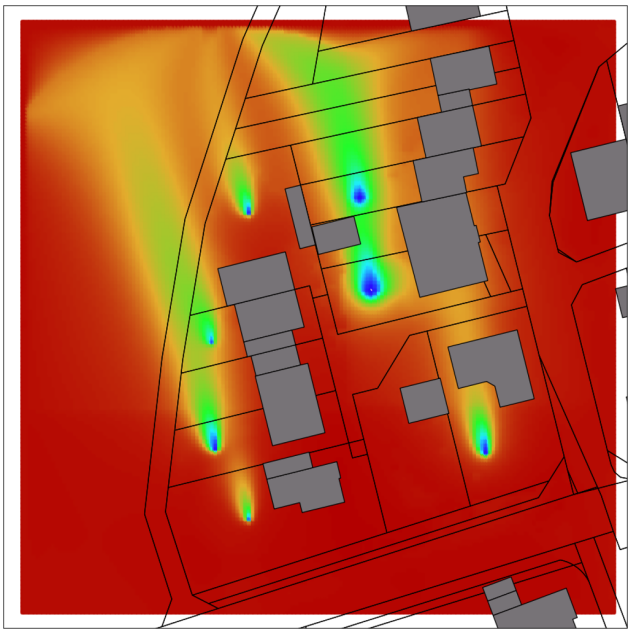


Abb. 2.12.: Exemplarische Temperaturfahnen im Untergrund durch die Nutzung von Erdwärmesonden bei vorhandener Grundwasserströmung [Weck-Ponten, 2017]

grundstücksflächenbezogenen Wärmeentzugs verwendet die nicht überbaute Grundstücksfläche, die Flächen von angrenzenden, nicht bebaubaren Grundstücken und Straßen, die Energiebezugsfläche des Gebäudes sowie die Energiebedarfe für Heizung und TWW, eine angenommene JAZ der Wärmepumpe und gegebenenfalls die Zubaurate von zukünftigen Erdwärmesonden.

Die vereinfachte Flächenbewertungsmethode von Poppei et al. [2019] bildet die gegenseitige thermische Beeinflussung von bestehenden und zukünftigen Erdwärmesonden auf der Grundlage von Vorsimulationen ab, ohne die Grundwassereinflüsse zu berücksichtigen. Eugster [2017] stellte fest, dass der Einfluss von Grundwasserströmungen für die Stabilisierung der Untergrundtemperaturen erheblich ist und sehr vereinfachte Rechenmethoden, ohne die Berücksichtigung von Grundwassereinflüssen (wie z. B. die Methode von Poppei et al. [2017]), mit Bedacht eingesetzt werden sollten.

Die gegenseitige thermische Beeinflussung von Erdwärmesondenanlagen erzeugt planerische und rechtliche Problemstellungen, die insbesondere bei steigenden Installationszahlen geothermischer Wärmepumpensysteme zum Tragen kommen und im Planungs- und Genehmigungsprozess berücksichtigt werden müssen. Das impliziert den Einsatz von geeigneten Simulationswerkzeugen schon in frühen Planungszeitpunkten.

Zusammenfassend beeinflussen insbesondere das WHG und das BBergG die maximale Bohrtiefe und die Genehmigungsfähigkeit der geothermischen Anlage am Standort. Bohrtiefenbegrenzungen können wiederum die Auswahl an zur Verfügung stehenden geothermischen Quellenanlagen und die maximale Leistung beschränken, die dem Untergrund von der Wärmepumpe entzogen werden kann. Somit haben die rechtlichen Vorgaben direkten Einfluss

auf die Dimensionierung des Wärmepumpensystems. Sonstige Gesetze, Verordnungen und Regelungen, die beim Bau und Betrieb von Erdwärmesondenanlagen tangiert werden können, jedoch aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit auf die Dimensionierung der Systeme nicht weiter erläutert werden, sind u. a. das Standortauswahlgesetz (StandAG), die Betriebssicherheitsverordnung oder die Gefahrstoffverordnung.

2.5.9. Übergreifende Systemzusammenhänge

Neben den gesetzlichen Randbedingungen ergeben sich bei der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme zahlreiche technische und physikalische Zusammenhänge zwischen den einzelnen planungsrelevanten Parametern. In Abbildung 2.13 sind die wesentlichen Zusammenhänge dargestellt.

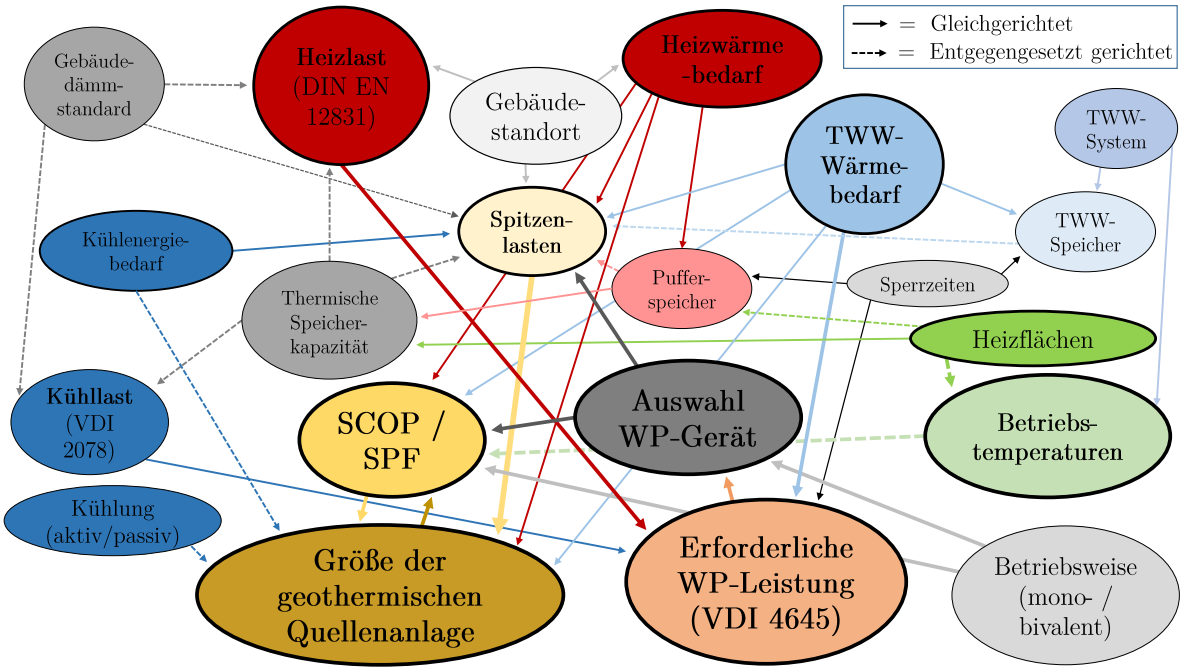


Abb. 2.13.: Zusammenhänge der Dimensionierungsparameter von geothermischen Wärmepumpensystemen

Ein zentraler Parameter in der Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme ist die erforderliche Wärmepumpenleistung nach VDI 4645 (vgl. Formel 2.7). Eine höhere Normheizlast nach DIN EN 12831, ein höherer TWW-Bedarf und höhere zusätzliche Wärmebedarfe implizieren auch eine größere erforderliche Nennleistung der Wärmepumpe. Demgegenüber sinkt die erforderliche Wärmepumpenleistung mit einer kleineren Heizlast, beispielsweise infolge einer energetischen Gebäudesanierung und einem höheren Dämmstandard der Gebäudehülle. Zudem wird die Normheizlast in Folge der Berechnungsweise kleiner, wenn die thermische Speicherkapazität des Gebäudes steigt und dadurch die erforderliche Wiederaufheizleistung sinkt (vgl. [DIN EN 12831, 2017]). Die Normheizlast ist insbesondere von der Normaußentemperatur und dem Standort des Gebäudes abhängig. Der TWW-Bedarf

ist u. a. von der TWW-Ausstattung, dem TWE-System, der Personenzahl und vom Nutzerverhalten abhängig. Ist die maximale Kühllast wesentlich größer als die Normheizlast, wird das System bezüglich der Gebäudekühlung dimensioniert. In solchen Fällen und bei einer aktiven Kühlung mit der Wärmepumpe beeinflussen die Kühlenergiebedarfe und die maximale Kühllast maßgeblich die erforderliche Wärmepumpenleistung. Ein weiterer Faktor, der die erforderliche Wärmepumpenleistung erhöht, sind Sperrzeiten der Wärmepumpe (vgl. Formel 2.7). Beim Vorhandensein von Sperrzeiten müssen auch die Puffer- und TWW-Speichervolumina größer dimensioniert werden, um die Zeiten, in denen die Wärmepumpe zwangsabgeschaltet ist, überbrücken zu können. Dabei ist die Pufferspeicherdimensionierung neben den Sperrzeiten u. a. von der thermischen Speicherkapazität des Gebäudes und vom Heizwärmeübergabesystem abhängig. In Abhängigkeit von der Größe der Heizflächen reduziert sich die Heizungsvorlauftemperatur. Im Vergleich zu Heizkörpern erhöhen Flächenheizungssysteme durch deren Wasserinhalt und die Speichermasse des Estrichs die thermische Speicherkapazität des Gebäudes.

Die Dimensionierung und der Betrieb geothermischer Wärmepumpensysteme sind durch die Wechselwirkungen zwischen der Wärmequelle, der Wärmepumpe, angeschlossenen Puffer- und TWW-Speichern, dem Heizungsverteilsystem, der thermischen Gebäudemasse und der Regelung geprägt. Beispielsweise kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden, wenn die Anlage monoenergetisch oder bivalent betrieben wird und ein Spitzenlasterzeuger zum Einsatz kommt. Die geringere Heizleistung ($\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$) und elektrische Leistungsaufnahme (P_{el}) der ausgewählten Wärmepumpe reduziert die Wärmeleistung, die dem Untergrund entzogen wird ($\dot{Q}_{Boden}$). Der Zusammenhang kann mittels einer Leistungsbilanz um den Verdampfer der Wärmepumpe nach folgender Formel dargestellt werden[13]:

$$\dot{Q}_{Boden} = \dot{Q}_{\mathrm{WP}} - P_{\mathrm{el}} \tag{2.9}$$

Zusätzlich wird die Entzugsleistung im Auslegungspunkt von der Höhe des COP beeinflusst. Mit einsetzen der Formel 2.2 in Gleichung 2.9 ergibt sich Gleichung 2.10:

$$\dot{Q}_{Boden} = \dot{Q}_{\mathrm{WP}} \cdot (1 - \frac{1}{COP}) \tag{2.10}$$

Bei Geräten mit einem höheren COP steigt somit die notwendige Entzugsleistung aus dem Untergrund im Auslegungspunkt.

Die erforderliche Größe der geothermischen Quellenanlage ist, neben der Nennleistung und dem COP der Wärmepumpe, maßgeblich von dem aus dem Untergrund entzogenen Lastprofil, der entzogenen Energiemenge, den in den Untergrundberechnungswerkzeugen angesetzten minimalen Bodentemperaturgrenzen, der Solezusammensetzung und den Boden- und

[13]Die in der vorliegenden Arbeit aufgeführten Formeln werden anhand folgender Vorzeichenkonvention aufgestellt: In die Bilanz eingehende Größen sind positiv und ausgehende Größen negativ.

Quellenanlagekennwerten abhängig. Letztere beinhalten z. B. die mittlere Wärmeleitfähigkeit des umgebenen Erdreichs, die Feuchtigkeit des Erdreichs, Grundwasserströmungen und den thermischen Bohrlochwiderstand (vgl. Abschnitt 2.5.7). Beim Einsatz von Erdwärmesonden haben zudem die Anzahl und Platzierung der Sonden auf dem Grundstück sowie die Anzahl und Tiefe benachbarter Erdwärmesondenanlagen Auswirkungen auf die Wärmequellenaustrittstemperatur und die spezifische Entzugsleistung der Sonden.

Bezüglich der Jahresenergiemengen leitet sich folgender Zusammenhang ab:

$$Q_{Boden} = Q_{WP,Nutz} \cdot (1 - \frac{1}{JAZ}) \tag{2.11}$$

Wird innerhalb der Untergrundberechnungswerkzeuge eine hohe JAZ angesetzt, steigt auch der geothermische Energiebedarf. Dementsprechend ist die geothermische Quellenanlage größer zu dimensionieren. Dadurch steigen die Investitionskosten der geothermischen Quellenanlage.

Die geothermischen Spitzenlasten und das der geothermischen Quellenanlage aufgeprägte Jahreslastprofil ergeben sich aus den Gebäudewärmelasten für die Beheizung und TWE, aus der Wärmeleistung der Wärmepumpe, die wiederum von den primär- und sekundärseitigen Temperaturniveaus abhängt sowie aus der Taktrate der Wärmepumpe. Letztere ist u. a. von der thermischen Speichermasse des Gebäudes und den Puffer- und TWW-Speichervolumina abhängig. Bei dem Wechsel vom Heizbetrieb auf die TWE und somit dem Wechsel auf ein meist höheres sekundärseitiges Temperaturniveau sinkt die Nutzwärmeleistung der Wärmepumpe (vgl. Abbildungen 2.5 und 2.6). Dadurch sinkt auch der dem Untergrund entzogene Wärmestrom. Kleinere Entzugsleistungen aus dem Untergrund steigern wiederum die geothermische Ergiebigkeit [Koenigsdorff, 2011].

Des Weiteren kann bei einem kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb die geothermische Quellenanlage durch eine aktive Regeneration des Erdreichs und die saisonale Speicherung von Wärme im Untergrund kleiner dimensioniert werden. Die Speicherfähigkeit des Untergrunds ist neben dem erschlossenen Volumen von vorhandenen Grundwasserströmungen abhängig. Wird mit dem Wärmepumpensystem zusätzlich gekühlt, erhöhen sich außerdem dessen Betriebsstunden in Abhängigkeit der angesetzten Kühlgrenztemperatur und des Kühlenergiebedarfs.

Eine überdimensionierte Quellenanlage bewirkt, bei ausreichendem geothermischen Energieangebot, höhere Wärmequellenaustrittstemperaturen im Betrieb und somit, bei gleichbleibendem Temperaturniveau der Sekundärseite, auch einen höheren SPF des Wärmepumpensystems. Infolgedessen wird in Koenigsdorff [2011] eine maßvolle Überdimensionierung der geothermischen Quellenanlage empfohlen.

Die JAZ ist, neben den Leistungszahlen des ausgewählten Wärmepumpengeräts in den jeweiligen Betriebspunkten und dem Temperaturniveau der Primärseite, zudem von den sekundärseitigen Betriebstemperaturen abhängig (vgl. Abschnitt 2.2). Das Temperaturniveau

der Sekundärseite wird u. a. durch den Anteil der Erzeugernutzwärmeabgabe für die TWE an der gesamten Erzeugernutzwärmeabgabe der Wärmepumpe[14] sowie der für die TWE und Beheizung angesetzten Vorlauftemperaturen bestimmt. Infolge einer energetischen Gebäudesanierung kann i. d. R. die Heizungsvorlauftemperatur gesenkt und damit wiederum die JAZ gesteigert werden. Zusätzlich bestimmt die JAZ auch den Strombedarf der Wärmepumpe und dadurch die bilanzierten THG-Emissionen und die laufenden Kosten.

In Abbildung 2.14 sind die auf eine Kilowattstunde Erzeugernutzwärmeabgabe bezogenen CO_2-Äquivalente einer Wärmepumpe mit verschiedenen JAZ und verschiedenen CO_2-Äquivalenten des deutschen Strommixes im Vergleich zu einem konventionellen Gas-Brennwertkessel dargestellt. Das CO_2-Äquivalent des deutschen Strommixes wird basierend auf dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) zu 560 g/kWh [BMJ, 2022] angesetzt und mit Prognosen verschiedener Strommix-Szenarien nach Fritsche u. Greß [2020] verglichen. Für Erdgas ergibt sich nach BMJ [2022] ein konstantes CO_2-Äquivalent von 240 g/kWh. Der Wirkungsgrad des Gas-Brennwertkessels wird bezogen auf den Brennwert nach Diefenbach et al. [2020] mit 92 Prozent angenommen.

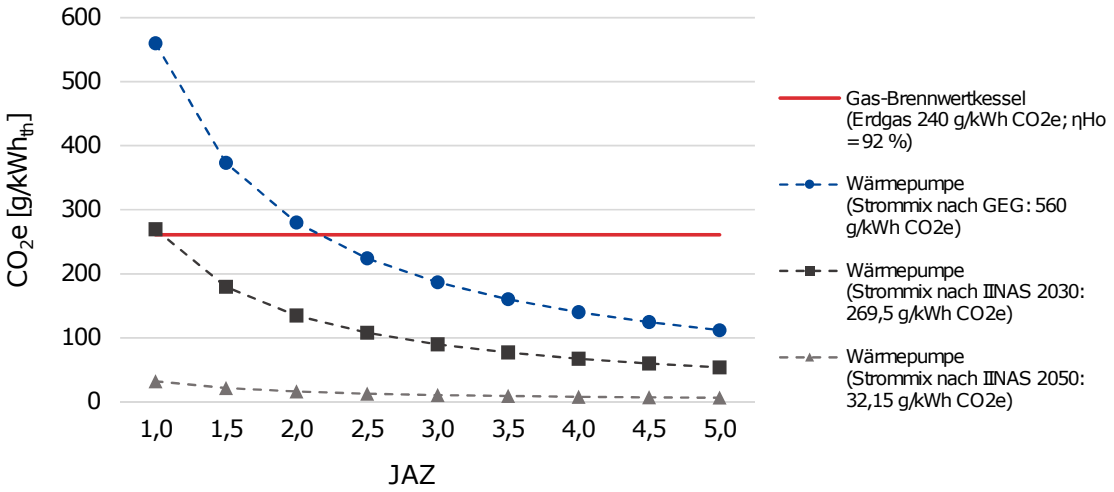


Abb. 2.14.: Spezifische CO_2-Äquivalente von Wärmepumpen mit verschiedenen JAZ, bezogen auf eine Kilowattstunde erzeugte Wärme, gegenüber einem konventionellen Gas-Brennwertkessel [LEA, 2022]

Mit steigender JAZ und sinkendem CO_2-Äquivalent des deutschen Strommixes sinken auch die bilanzierten THG-Emissionen der Wärmepumpe. Letztere werden anhand des aktuellen Kraftwerksmixes im Stromsektor festgelegt. Wird der Strombedarf für die Wärmepumpe vollständig aus regenerativen Energien gedeckt, ist die oberflächennahe Geothermie eine rein erneuerbare Energiequelle. Aktuell wäre eine Wärmepumpe mit einer JAZ von knapp über zwei bezüglich der THG-Emissionen vorteilhafter als ein Gas-Brennwertkessels [LEA, 2022]. Generell begünstigt die fortschreitende Dekarbonisierung des deutschen Strommixes die THG-Bilanz der Wärmepumpe.

[14] Im folgenden vereinfacht als TWW-Anteil abgekürzt.

Neben dem CO_2-Äquivalent sind auch die laufenden Kosten von der JAZ abhängig. Entscheidende Faktoren zur Bestimmung der bedarfsgebundenen Kosten sind u. a. die eingesetzte elektrische Energiemenge und der Strompreis. Vergünstigte Wärmepumpenstromtarife können die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpensystemen erhöhen, jedoch auch mit Auflagen wie vorgeschriebenen Sperrzeiten verbunden sein.

Ein weiterer Zusammenhang ergibt sich zwischen der Größe der geothermischen Anlage bzw. der möglichen geothermischen Wärmenutzung und der Planungskomplexität des Projektes (siehe Abbildung 2.15).

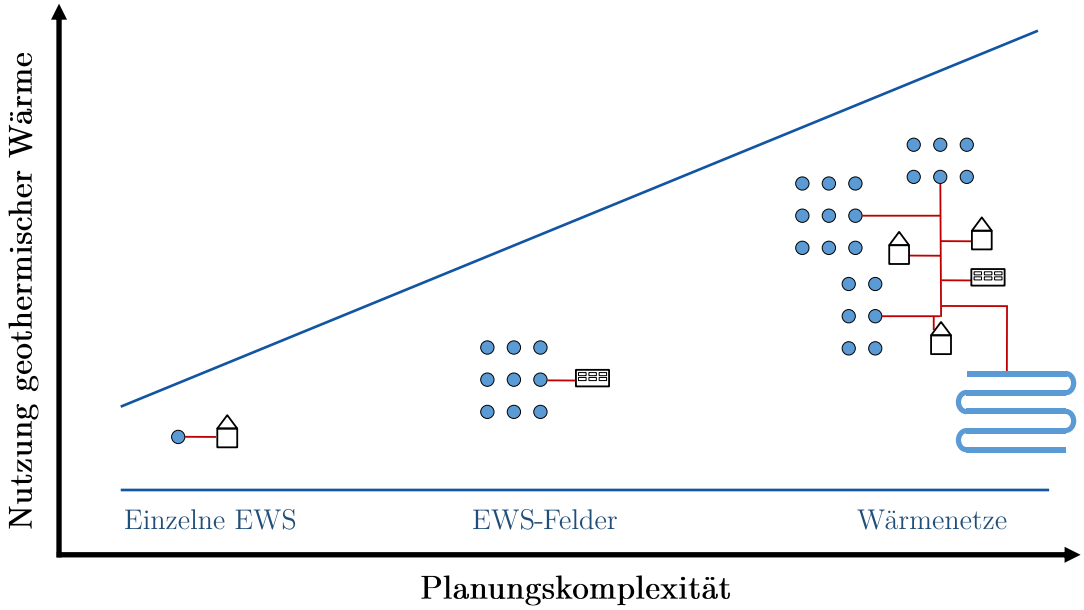


Abb. 2.15.: Zusammenhang der Einbindung erneuerbarer Energien und der Planungskomplexität geothermischer Systeme

Mit zunehmender Projektgröße steigt bei geothermischen Anlagen aufgrund von zusätzlichen Randbedingungen und Einflussfaktoren auch die Planungskomplexität. Beispielsweise müssen bei großen Gebäuden und Quartieren mit Erdwärmesondenfeldern oder mehreren verteilten Einzelsonden i. d. R. Grundwasserströmungen, die thermischen Wechselwirkungen zwischen Erdwärmesonden untereinander, thermische Wechselwirkungen zwischen geothermischen Anlagen, installierten Wärmenetzen und sonstigen Infrastrukturen im Untergrund sowie gleichzeitige Wärmeinträge und -austräge in bzw. aus dem Untergrund berücksichtigt werden. Aufgrund der grundstücksübergreifenden Betrachtung von Quartiersprojekten können meist zusätzliche und örtlich getrennte Flächen zur Gewinnung geothermischer Energie genutzt sowie weitere Wärmequellenarten wie z. B. Abwärme oder solarthermisch erzeugte Wärme durch den Einsatz eines Wärmenetzes gesammelt und verteilt werden. Dadurch steigen die Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien und geothermischer Wärmeenergie. Demgegenüber sind Wärmenetze als zusätzliche Komponenten und deren dynamische Effekte über Wärmenetzsimulationen in der Planung zu berücksichtigen, sodass die Planungskomplexität mit dem Einsatz von Wärmenetzen zunimmt.

Insgesamt ergeben sich eine Vielzahl an gegenseitigen Wechselwirkungen und Zusammenhängen bei der Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme. Darüber hinaus geben genehmigungsrechtliche Restriktionen und bestehende geothermische Anlagen in der Nähe zum Planungsobjekt zusätzliche Randbedingungen vor. Die daraus resultierende Komplexität erfordert schon in frühen Planungszeitpunkten ganzheitliche Planungsmethoden.

2.6. Kommunale Wärmeplanung

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie sind, u. a. aufgrund thermischer Einflüsse auf Nachbargrundstücke und benachbarte geothermische Anlagen, Systemkonzepte notwendig, die grundstücksübergreifende Analysen beinhalten. Insbesondere bei einer lokalen Häufung geothermischer Systeme wird eine strategische Planung für eine nachhaltige und gleichberechtigte geothermische Nutzung des Untergrunds benötigt [Poppei et al., 2019].

Die kommunale Wärmeplanung ist eine Methode bzw. ein wissenschaftlich fundierter politischer Prozess [Maaß, 2020] für eine ganzheitliche und strategische Planung der zukünftigen Wärmeversorgung in Bereichen von Städten, Kommunen, Stadtteilen und Quartieren. Zweck der kommunalen Wärmeplanung ist die Entwicklung von übergeordneten klima- und energiepolitischen Zielpfaden zur Erreichung einer wirtschaftlichen und treibhausgasneutralen Wärmeversorgung in der betrachteten Kommune sowie daraus resultierende Maßnahmenkataloge mit konkreten Investitionsentscheidungen [Maaß, 2020]. Innerhalb von kommunalen Wärmeplänen werden umsetzungsorientierte und koordinierte Konzepte unter Berücksichtigung von lokalen Randbedingungen erarbeitet [Maaß, 2020], in denen verschiedene Technologien und Wärmequellen, wie die oberflächennahe Geothermie oder Abwärmepotenziale, auf der Grundlage von Machbarkeitsstudien, Systemvergleichen sowie Standort- und Potenzialanalysen untersucht und bewertet werden. Im Zuge der Wärmepläne sind u. a. sowohl der aktuelle als auch der anhand von energetischen Gebäudesanierungen und dem Austausch der Erzeugungsstrukturen prognostizierte Wärmebedarf der Kommune sowie das lokale bzw. regionale Potenzial erneuerbarer Energien zu bestimmen. Ein überregionaler Austausch mehrerer Kommunen und die Erarbeitung von kommunenübergreifenden Konzepten kann u. a. durch einen abgestimmten Ausbau von Wärmenetzen die effiziente Einbindung regenerativer Energietechnologien und dadurch die Dekarbonisierung des Wärmesektors beschleunigen.

Darüber hinaus können kommunale Wärmepläne als übergeordnetes Planungsinstrument Randbedingungen für Systemvergleiche und Machbarkeitsstudien vorgeben, sodass die Entscheidungsfindung in frühen Planungsphasen unterstützt werden kann. Gleichzeitig bilden kommunale Wärmepläne bei einer geregelten Umsetzung die Grundlage für die Detailplanung [KEA-Niedersachsen, 2019].

In Deutschland sind kommunale Wärmepläne, im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern wie Dänemark, der Schweiz oder den Niederlanden, bisher noch nicht etabliert (vgl. [Agora, 2021; Maaß, 2020; Poppei et al., 2017, 2019]). Nur wenige deutsche Kommunen haben bislang ganzheitliche kommunale Wärmepläne erstellt [Köhler et al., 2021]. Zwar haben

einige Kommunen, Stadtwerke und Wärmenetzbetreiber auf freiwilliger Basis Wärmenetzausbaupläne oder Klimaschutzteilkonzepte im Wärmebereich ausgearbeitet [Köhler et al., 2021], jedoch bilden diese Konzepte die ganzheitliche Sichtweise auf die Transformation des Wärmesektors und die zur Verfügung stehenden Technologien oft nur unzureichend ab. Zudem haben manche Bundesländer Leitfäden für die Erstellung von kommunalen Wärmeplänen erstellt (vgl. hierzu u. a. [KEA-BW, 2020; KEA-Niedersachsen, 2019]) oder, wie z. B. Hamburg und Baden-Württemberg, bereits den verpflichtenden Einsatz von kommunalen Wärmeplänen innerhalb ihrer Klimaschutzgesetze verankert [KEA-BW, 2022; Köhler et al., 2021]. Momentan ist eine Steigerung der Etablierung und Umsetzung kommunaler Wärmepläne sowie dafür notwendige Vorbereitungsmaßnahmen zu verzeichnen [Köhler et al., 2021]. Die bundesweite Verpflichtung für kommunale Wärmepläne wurde im Sommer 2023 während des Gesetzgebungsverfahrens zur Überarbeitung des GEG für Deutschland beschlossen und soll mit dem *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz)* zum 01.01.2024 zusammen mit der Änderung des GEG in Kraft treten [BMWSB, 2023]. In der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld (Komunalrichtlinie) sind bereits seit November 2021 die kommunale Wärmeplanung und Anforderungen für die Förderfähigkeit von Maßnahmen verankert [Bundesregierung, 2022].

Durch den ganzheitlichen Ansatz und die Analyse möglichst aller Technologien zur regenerativen Bereitstellung von Wärmeenergie bieten kommunale Wärmepläne die Chance, oberflächennahe geothermische Systeme in das Energiesystem und die Wärmeinfrastruktur flächendeckend zu integrieren. Durch einen zukünftig zunehmenden Einsatz der kommunalen Wärmeplanung wird auch der Bedarf an Methoden und Werkzeugen ansteigen, die übergreifende Variantenvergleiche, GIS-basierte geothermische Standortanalysen und die Abbildung der thermischen Beeinflussung der Systeme im Untergrund ermöglichen.

2.7. Modellierung in der oberflächennahen Geothermie

Die Planung von geothermischen Wärmepumpensystemen ist sehr komplex. Sie wird von den Fachgebieten Antrags- und Genehmigungsverfahren, Standortanalysen, Dimensionierung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems, Geologie und Hydrogeologie, Gebäude und Quartiere, Wärmenetze, Anlagentechnik sowie der Abbildung von Wechselwirkungen benachbarter geothermischer Systeme tangiert. Zum Einsatz kommen sowohl GIS und Datenbanken als auch Dimensionierungswerkzeuge, Simulationen, analytische Berechnungen und Modellkopplungen (vgl. Abbildung 1.1). Dementsprechend sind in der Planungspraxis oberflächennaher geothermischer Systeme die Herangehensweisen, die Detailtiefen und die eingesetzten Methoden und Modellierungsarten sehr heterogen. In den Abbildungen 2.16 und 2.17 sind einerseits eine Übersicht von Modellarten sowie deren Zweck, Einsatzbereiche, Modellierungsarten, Zeitschrittweiten und abgebildete Verfahren dargestellt und andererseits die eingesetzten Werkzeuge anhand deren zeitlichen und räumlichen Horizonten verortet.

Modellart	Zweck	Einsatzbereich	Modellierungsarten / Verfahren	Zeitschrittweite
GIS / CityGML	Datenaggregation / -visualisierung	(Einzelgebäude) / Quartier	2D-Karten/3D-Gebäudemodelle	-
Gebäude und Anlagentechnik				
Gebäude	Energiebedarf / Lastkurven	Einzelgebäude / Quartier	1D-3D Ein-/Mehrzonen Monatsbilanz ROM / Detailmodell	Monate / h
Wärmepumpe	Anlagenverhalten	Einzelgebäude / (Quartier)	Statisch/dynamisch	Minuten
Erdwärmesonden	Einfluss auf Anlagenverhalten	Einzelsonde / Sondenfeld	g-Funktionen (analytisch)	h
Untergrundmodelle				
Erdwärmesonden	Energieentzug/-eintrag	Einzelsonde / Sondenfeld	Bohrlochwiderstand/ Numerisch (FD/FE/FV)	h / Minuten
Umgebenes Erdreich	Regeneration / Temperaturfahnen	Einzelsonde / Sondenfeld	g-Funktionen (analytisch)/ Numerisch (FE/FV)	h / Minuten

Abb. 2.16.: Übersicht von in der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme eingesetzten Modellarten sowie deren Zweck, Einsatzbereiche, eingesetzte Modellierungsarten, Verfahren und Zeitschrittweiten

Für geothermische Standortanalysen sowie der Datenaggregation und Datenvisualisierung sind GIS und geothermische bzw. (hydro)geologische Informationsportale notwendig, die Informationen zur Geologie und Hydrologie in Form von 2-D-Kartenmaterial enthalten. Auf Quartiersebene kann i. d. R. auf 3D-CityGML-Gebäudemodelle zurückgegriffen werden. Während GIS-basierte Standortanalysen bei nahezu allen geothermischen Projekten zum Einsatz kommen, werden u. a. in Abhängigkeit von der Projektgröße unterschiedliche Modelle für Gebäude-, Anlagen- und Untergrundsimulationen genutzt.

Thermisch-energetische Gebäudesimulationen erzeugen i. d. R. stundengenaue Jahreslastprofile des Gebäudeenergiebedarfs, analytische Berechnungsverfahren wie z. B. das Monatsbilanzverfahren i. d. R. monatliche Werte. Die thermisch-energetische Gebäudesimulationen, Quartierssimulationen, Abschätzverfahren und analytische Modelle unterscheiden sich bezüglich der räumlichen Horizonte in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzbereichs.

Auf Einzelgebäudeebene werden die Jahreslastprofile für große Gebäude meist anhand von detaillierten thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen in Form von 3D-Mehrzonenmodellen bestimmt. Die Programme beinhalten i. d. R. Modellbibliotheken mit integrierten Wärmepumpenmodellen, die das Anlagenverhalten und die JAZ dynamisch berechnen. Thermisch-energetische Gebäudesimulationen berücksichtigen u. a. Wetterdaten und dynamische Abhängigkeiten zwischen Gebäudehülle, Raumklima, Anlagentechnik und Nutzerverhalten. Die verwendeten Wetterdaten und der Jahresgang der Außenlufttemperaturen haben einen großen Einfluss auf den simulierten Energiebedarf für Raumheizung bzw. -kühlung.

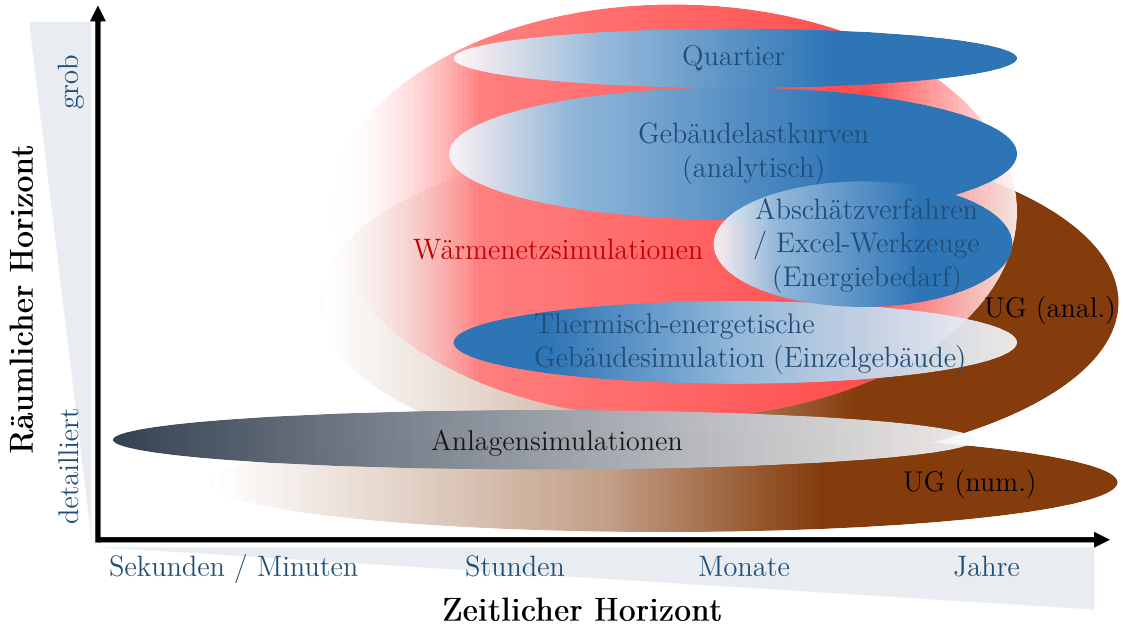


Abb. 2.17.: Sammlung von Werkzeugarten für die Dimensionierung und Simulation geothermischer Wärmepumpensysteme sowie deren Verortung bezüglich ihrer zeitlichen und räumlichen Betrachtungsweiten (blau: Simulationen und Berechnungen Gebäude und Quartiere; braun: Untergrundsimulationen (analytisch und numerisch))

Im Gegensatz zu großen Gebäuden werden Einfamilienhäuser oft auf der Grundlage von vereinfachten Berechnungswerkzeugen bzw. Abschätzverfahren abgebildet. Vereinzelt werden Gebäudeenergiebedarfe von Ingenieurbüros oder Gebäudetechnikern auch über Faustformeln abgeschätzt oder über Berechnungswerkzeuge auf Basis der Normen DIN EN 12831 oder DIN V 18599 berechnet.

Auf Stadtquartiersebene werden i. d. R. Quartierssimulationen in Form von Einzohnenmodellen geringer Ordnung (englisch: Reduced Order Model (ROM)) und analytische Quartierswerkzeuge mit groben räumlichen Betrachtungsweiten eingesetzt. Die Anlagentechnik wird dabei oft vereinfacht abgebildet.

Wärmenetzsimulationen betrachten einerseits, aufgrund der Modellierung von Rohrleitungen und der Abbildung des Strömungsverhaltens innerhalb der Rohre, kleine räumliche Abstände. Andererseits verläuft das Wärmenetz über große räumliche Skalen innerhalb eines Stadtteils, einer ganzen Stadt oder überregional zwischen Städten und Kommunen.

Die Einbindung von Anlagensimulationen in den Planungsprozess erfolgt beispielsweise bei der Nutzung von analytischen Gebäudeberechnungsprogrammen, in denen Anlagenmodelle nicht enthalten sind. Hier liegt der Fokus auf der Anlagentechnik und somit auf kleineren räumlichen Horizonten. Anlagen- und Wärmenetzsimulationen benötigen zur Abbildung der Dynamiken mitunter Zeitschritte im Bereich weniger Minuten. Die Betrachtungsdauer von Anlagen-, Gebäude- und Wärmenetzsimulationen beträgt meist ein Jahr.

Untergrundmodelle bilden die Vorgänge in und die Bereiche um die geothermische Quellenanlage im Gegensatz zu Gebäudesimulationsprogrammen räumlich detaillierter ab. Sie werden zur Abbildung der thermischen Veränderungen im Boden und der Berechnung des Energieentzugs bzw. des Energieeintrags in den Boden mit einem Betrachtungszeitraum von Stunden bis zu mehreren Jahrzehnten eingesetzt. Die Abbildung der Erdwärmesonde bzw. des umgebenen Erdreichs ist neben dem langen Betrachtungszeitraum u. a. von den komplexen Wärmetransportvorgängen im Untergrund und den großen räumlichen Skalenunterschieden geprägt [van Treeck et al., 2020]. Als Vereinfachung wird der Untergrund in die Bereiche innerhalb und außerhalb des Bohrlochs unterteilt [van Treeck et al., 2020].

Analytische Modelle bilden die Fluidströmung innerhalb der Erdwärmesonde i. d. R. über den thermischen Bohrlochwiderstand und das umgebene Erdreich über g-Funktionen (englisch: g-functions) ab [van Treeck et al., 2020]. Die g-Funktionen sind dimensionslose Temperatursprungantworten in Form von analytischen Funktionen. Sie basieren auf dem Ansatz von Eskilson [1987], bilden die Sondengeometrie ab und berücksichtigen Wärmeleitungs- und Wärmespeicherprozesse im Untergrund [Koenigsdorff, 2011]. Analytische Modelle für Erdwärmesonden sind teilweise in der Modellbibliothek thermisch-energetischer Gebäudesimulationsprogramme enthalten.

Neben analytischen Untergrundmodellen werden oft analytisch-numerische Hybridansätze verwendet [van Treeck et al., 2020]. Oft wird die Erdwärmesonde als Modell-im-Modell-Ansatz modelliert und der umgebene Untergrund über numerische Methoden wie die Finite Elemente Methode (FEM) oder die Finite Volumen Methode (FVM) berechnet [van Treeck et al., 2020]. Bei einer Berücksichtigung von Grundwasserströmungen können Temperaturfahnen im Untergrund berechnet und innerhalb von geothermischen Informationssystemen über größere räumliche Skalen dargestellt werden. Damit kann die thermische Beeinflussung von Erdwärmesonden untereinander bzw. der Einfluss des Sondenbetriebs auf benachbarte Liegenschaften untersucht werden. Weitere Informationen zur mathematischen Modellierung von Erdwärmesonden und den Wärmeübertragungsmechanismen im Boden sind in van Treeck et al. [2020] enthalten.

2.8. Bestehende Planungswerkzeuge

In den folgenden Abschnitten werden Werkzeuge beschrieben, die die Planung oberflächennaher geothermischer Wärmepumpensysteme unterstützen können. Dazu werden ausgewählte Programme in den Bereichen Gebäude, Anlagentechnik und Untergrund sowie Systemkonfiguratoren und praxisnahe Werkzeugketten und Plattformen beschrieben und hinsichtlich deren Einsatzbereichen, Funktionen und deren Integrationsfähigkeit in das Mehrebenen-Planungswerkzeug der vorliegenden Arbeit analysiert. Die Auswahl der zu betrachtenden Werkzeuge konzentriert sich aufgrund des Kerns der vorliegenden Arbeit auf Sole-Wasser-Wärmepumpenmodelle und Systemkonfiguratoren sowie ganzheitliche Werkzeugketten für geothermische Systeme, welche Standortanalysen, die Dimensionierung des Gesamtsystems,

Systemvergleiche und die Berücksichtigung genehmigungsrechtlicher Restriktionen ermöglichen. Zusätzlich wird auf spezielle Berechnungswerkzeuge für Erdwärmesonden, auf Programme zur Berechnung von Gebäudeenergiebedarfen und -lastkurven sowie auf Anlagensimulationsprogramme und thermisch-energetische Gebäudesimulationsprogramme, die geothermische Systeme abbilden können, verkürzt eingegangen.

2.8.1. Gebäude-, Quartiers- und Anlagensimulation

Für die Dimensionierung oberflächennaher geothermischer Systeme werden u. a. die Normheizlast und Energiebedarfe für Heizung, TWW oder Kühlung benötigt. Im Idealfall werden stundengenaue Lastkurven erzeugt und für die Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme herangezogen. In Abhängigkeit des Gebäudetyps, der Gebäudeanzahl, der Planungsphase und der an der Planung Beteiligten kommen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz. Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele von Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen beschrieben, die stundengenaue Gebäudelastkurven erzeugen können und Dynamiken der Anlagentechnik oder Randbedingungen wie z. B. Wetterdaten berücksichtigen. In Tabelle 2.2 sind Eigenschaften und Funktionalitäten der beschriebenen Programme aufgelistet.

Tab. 2.2.: Eigenschaften und Funktionalitäten ausgewählter Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen bzw. Fallbeispiele

Referenz	Programm	A	B	C	D	E	F
[Eicker et al., 2012; Weiler et al., 2019]	SimStadt INSEL 8	(x)	(x)	–	–	x	–
[Koschwitz et al., 2016]	SCoTED	x	x	x	x	x	–
[Remmen et al., 2017]	TEASER Modelica	x	(x)	–	x	x	–
[EnergyPlus, 2022; IDA, 2022; TRNSYS, 2022]	IDA ICE TRNSYS EnergyPlus	x	x	x	x	–	(x)

A = Erzeugung von stundengenauen Gebäudelastkurven für Heizung; B = Erzeugung von stundengenauen Gebäudelastkurven für TWW; C = Erzeugung von stundengenauen Gebäudelastkurven für Kühlung; D = Einsatz auf Einzelgebäudeebene; E = Einsatz auf Quartiersebene; F = Modell für Erdwärmesonden integriert; x = Ja; – = Nein; (x) = teilweise; ? = keine Informationen

In Eicker et al. [2012] wird eine Methodik für Quartierssimulationen beschrieben, die unter Nutzung von 3D-Gebäudemodellen des offenen Schemas City Geography Markup Language (CityGML) und Berechnungen nach DIN V 18599 monatliche Gebäudelasten erzeugt. Die Methodik ist innerhalb des Werkzeugs SimStadt implementiert [Nouvel et al., 2015]. In Weiler et al. [2019] werden die mit SimStadt berechneten Monatsbedarfe anhand stündlicher

Außenlufttemperaturen und der gewünschten Raumtemperatur in Anlehnung an VDI 4710 in stundengenaue Lastkurven umgerechnet und zur Anlagendimensionierung genutzt.

Ein weiterer Softwareansatz, der bei Informationsknappheit anhand von Wetterdaten und Energiebedarfen stundengenaue Lastkurven erzeugen kann, ist in Koschwitz et al. [2016] beschrieben. Auf Grundlage der vereinfachten Verfahren zur Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 Beiblatt 2 und TRY-Wetterdatensätzen wird mit SCoTED (*Simplified Calculation of Thermal Energy Demand*) u. a. eine geordnete Jahresdauerlinie berechnet, die Wärmebedarfe für Heizung und TWW berücksichtigt. Das Programm wird aktuell innerhalb des Projektes *GeoWaermeWende - Geoportal-basiertes Monitoring eines geothermisch gespeisten kalten Nahwärmenetzes als Beitrag zur Wärmewende mit aktiver Nutzereinbindung* (FKZ: 03EN3059A) für den Einsatzbereich der Kühlung erweitert und in der Programmiersprache Python implementiert.

Zur Abbildung von dynamischen Prozessen zwischen der Gebäudehülle, der Anlagentechnik, dem Raumklima, der thermischen Behaglichkeit sowie Umwelt-, Wetter- und Nutzereinflüssen können thermisch-energetische Gebäudesimulationsprogramme wie z. B. IDA ICE [IDA, 2022], TRNSYS [TRNSYS, 2022] und EnergyPlus [EnergyPlus, 2022] eingesetzt werden. Auf Grundlage ein- oder mehrzoniger Gebäudemodelle und integrierten Teilmodellen, u. a. für Wärmepumpen, thermische Speicher, das Heizungsverteilsystem und Regelstrategien, können Gebäudeenergiebedarfe berechnet und meist als stundengenaue Lastkurven ausgegeben werden. Zur Berechnung von Erdwärmesondenanlagen können die Modellbibliotheken der Gebäudesimulationsprogramme i. d. R. um Teilmodelle für geothermische Quellenanlagen erweitert werden. Die Programme benötigen Simulationsexpertise, eine Vielzahl an Eingabeparametern und Rechenkapazitäten, sodass sie vorwiegend im Einzelgebäudebereich eingesetzt werden. Aus Zeit- und Kostengründen sowie aufgrund der Knappheit von Gebäude- und Anlageninformationen werden thermisch-energetische Gebäudesimulationen in frühen Planungsphasen und auf Quartiersebene selten eingesetzt. Weiterhin sind mit den erweiterten Gebäudesimulationen die Berücksichtigung von unterschiedlichen Bodenschichten [Bockelmann et al., 2011], die Berechnung von Temperaturfahnen im Untergrund aufgrund von Grundwasserströmungen und die Bestimmung der thermischen Beeinflussung von mehreren Erdwärmesondenanlagen untereinander i. d. R. nicht möglich. Zusätzlich ist ein automatisiertes Ansteuern dieser Programme innerhalb einer Werkzeugkette aufgrund der komplexen Gebäudemodellerstellung, der Vielzahl an benötigten Eingabeparametern und deren heterogene Informationsverfügbarkeit mit Herausforderungen verbunden.

Des Weiteren können auch vereinfachte Gebäudemodelle aus Modellbibliotheken für objektorientierte Modellierungssprachen wie z. B. Modelica [Modelica, 2022] oder sonstige Software wie z. B. MATLAB/Simulink [MathWorks, 2022] zur Abbildung von dynamischen Effekten eingesetzt werden. Beispiele für Modelica-Bibliotheken sind u. a.: IEA EBC Annex 60 [Annex60, 2022], IBPSA [IBPSA, 2022], AixLib [EBC, 2022; Müller et al., 2016], Buildings [DoE, 2022], BuildingSystems [UDK, 2022] oder IDEAS [IDEAS, 2022]. Je nach Detailgrad der verwendeten Modelle ergibt sich die Anzahl der notwendigen Eingabeparameter.

In Remmen et al. [2017] wird das Werkzeug TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit) beschrieben, das anhand von wenigen Parametern und Randbedingungen Modelica-Typgebäudemodelle geringer Ordnung aus der AixLib-Bibliothek mit Informationen anreichert und die Modelle parametriert. Auf Grundlage der angereicherten Gebäudemodelle und Wetterdatensätze können Gebäudeenergiebedarfe in Form von stundengenauen Lastkurven erzeugt werden. Insbesondere auf Quartiersebene, wo wenige detaillierte Gebäudeinformationen vorhanden sind, können solche Werkzeuge eingesetzt werden.

Ein weiterer Werkzeugtyp sind Anlagensimulationsprogramme für Heizungssysteme, die speziell für oberflächennahe geothermische Systeme entwickelt oder mit Teilmodellen für geothermische Quellensysteme erweitert wurden [VBI, 2012]. Diese Programme simulieren i. d. R. kein dynamisches Mehrzonen-Gebäudemodell, sondern benötigen die Normheizlast oder Energiebedarfe als Eingabeparameter für die Anlagensimulation. Zur Abbildung von Erdwärmesonden werden in Deutschland u. a. die Anlagensimulationsprogramme GeoT*SOL [Valentin, 2022], Polysun [Velasolaris, 2022] und WP-OPT [WPsoft, 2022] eingesetzt [VBI, 2012]. Innerhalb dieser Programme können verschiedene Anlagenkonfigurationen in Kombination mit Erdwärmesonden und teilweise auch mit Erdwärmekollektoren oder Grundwasserbrunnen ausgewählt und simuliert werden [VBI, 2012]. Da diese Programme teilweise auch Funktionalitäten zur Systemkonfiguration enthalten, wird auf sie im Abschnitt 2.8.4 eingegangen.

2.8.2. Berechnungswerkzeuge für Erdwärmesonden

In der Praxis werden bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern i. d. R. analytische Berechnungsprogramme basierend auf den g-Funktionen genutzt [Bockelmann et al., 2011]. Für die Abschätzung der thermischen Auswirkungen auf den Untergrund kommen i. d. R. numerische Simulationen mit Berücksichtigung von Grundwasserströmungen zum Einsatz [Eisele et al., 2019a]. Nach VDI 4640 [2019] werden Simulationen und Rechenverfahren u. a. ab bestimmten Nennwärmeleistungen der Wärmepumpe bzw. bei thermischer Beeinflussung durch angrenzende Erdwärmesonden empfohlen (siehe Abschnitt 2.5.7).

Berechnungs- bzw. Simulationsverfahren für Erdwärmesonden benötigen nach VDI 4640 [2019] mindestens den thermischen Bohrlochwiderstand, die über die Tiefe gemittelte Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrunds sowie ein auf die Erdwärmesonde aufgeprägtes Jahreslastprofil. Das Lastprofil wird häufig aus Gebäudeenergiebedarfen und einer angenommenen JAZ der Wärmepumpe erzeugt. In der Literatur existieren einige Berechnungswerkzeuge für die Dimensionierung oder Simulation von geothermischen Quellensystemen. Die Wärmequellenmodelle nutzen typischerweise stündliche Zeitschritte und haben monatliche Gebäudelasten als Eingangsdaten [Kummert u. Bernier, 2008]. In Tabelle 2.3 sind ausgewählte Modelle, die in der Forschung und Praxis verwendet werden, exemplarisch aufgelistet.

Tab. 2.3.: Eigenschaften und Funktionalitäten ausgewählter Modelle und Werkzeuge zur Berechnung von Erdwärmesonden

Referenz	MT	Programm	GW	Geb	WP
[Spitler, 2000]	H	GLHEPro	?	M	KM (W-L-WP)
[BLOCON, 2022]	A	EED	–	M(H)/ J(TWW)/ S(V.4)/ SL	JAZ(H,TWW, K)
[Hochschule Biberach, 2006]	A	GeoSyst 4.0	(x)	M (kein TWW)	MAZ
[Huber, 2021]	H	EWS	(x)	M/J	JAZ / LZ
[Diersch, 2014]	H	FEFLOW	x	?	KRB
[Koenigsdorff u. Van de Ven, 2019]	HV	GEO-HAND^{light}	–	J (SK+SL(H))	–

A = Analytisches Modell (g-Funktionen); Geb = Abbildung der Gebäudeenergiebedarfe; GW = Abbildung des Grundwassereinflusses; H = hybrider Ansatz (numerisch und analytisch); HV = Handrechenverfahren; J = Jährliche Gebäudelasten; KM = Kennlinienmodell; KRB = Konstante Randbedingungen; LZ = Leistungszahlen; M = Monatliche Gebäudelasten; MAZ = Monatliche Arbeitszahlen; MT = Modelltyp; S = Stündliche Gebäudelasten; SK = Sinuskurve; SL = Spitzenlasten; V. = Version; W-L-WP = Wasser-Luft-Wärmepumpe; WP = Abbildung der Wärmepumpe; x = Ja;
– = Nein; (x) = teilweise; ? = keine Informationen

Ein Beispiel ist das Dimensionierungswerkzeug GLHEPro. Die Version 3 von GLHEPro ist in Spitler [2000] beschrieben. Das Werkzeug legt den Fokus auf die Erdwärmesondendimensionierung und benutzt zwei verschiedene Rechenansätze zur Abbildung der Erdwärmesonde und ein sehr vereinfachtes Wasser-Luft-Wärmepumpenmodell, das monatliche Gebäudelasten in Entzugsleistungen aus dem Untergrund im Heizfall und Eintragsleistungen im Kühlfall in Abhängigkeit von der Wärmequellenaustrittstemperatur und auf Basis eines monatlichen Zeitschritts umrechnet. Die für die Berechnung notwendigen Herstellerleistungskurven werden als biquadratische Gleichungen abgebildet. Innerhalb einer grafischen Nutzeroberfläche kann der Nutzer verschiedene Angaben zu Boden- und Sondeneigenschaften eingeben. Die Herstellerkennlinien der Wärmepumpe werden aus einer Bibliothek ausgewählt, die vom Nutzer geändert werden kann. Anhand von minimalen und maximalen Wärmequellenaustrittstemperaturen werden Randbedingungen für die Simulation mit einem monatlichen Zeitschritt vorgegeben. Die Gebäudelasten werden als monatliche Grund- und Spitzenlasten abgebildet. Als Ergebnis wird u. a. die berechnete Sondenlänge ausgegeben. [Spitler, 2000]

Im Folgenden werden Berechnungswerkzeuge für Erdwärmesonden vorgestellt, die insbesondere in Deutschland in Kombination mit Sole-Wasser-Wärmepumpen eingesetzt werden. Die am häufigsten verwendeten Programme bei Fachplanern sind Earth Energy Designer (EED) [EED, 2022], Erdwärmesonden (EWS) [Huber, 2022] und Finite Element Subsurface FLOW simulation system FEFLOW [FEFLOW, 2022]. Zusätzlich werden die Werkzeuge GeoSyst

und GEO-HAND^{light} aufgrund von Schnittmengen zu der vorliegenden Arbeit beschrieben. Die Anwendungsbereiche, Eingabeparameter und Ergebnisse der Programme werden im Folgenden kurz dargelegt. Bezüglich der Eingangsparameter liegt der Fokus der Betrachtung auf den Eingaben für Wärmepumpen und Gebäudelasten, um die Abbildung der Gebäudeseite zu analysieren.

EED ist ein analytisches Berechnungsprogramm für Erdwärmesonden, das g-Funktionen nutzt, um die Einhaltung der Temperaturgrenzen des Bodens über einen langen Betrachtungszeitraum zu überprüfen [VBI, 2012]. EED enthält mehrere tausend g-Funktionen für verschiedene Sondengeometrien und -anordnungen, mit denen die vertikal gemittelte Temperatur am Bohrlochrand berechnet werden kann [Koenigsdorff, 2011]. EED unterscheidet nicht zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, sondern ermittelt den Mittelwert aus beiden Temperaturen [BLOCON, 2021]. Vertikale Temperaturunterschiede, wetterinduzierte Temperaturschwankungen in den oberen Metern des Erdreichs und konvektive Wärmeübertragung aufgrund von Grundwasserströmungen werden nicht berücksichtigt [Koenigsdorff, 2011]. Darüber hinaus ist auch die Abbildung von Temperaturfahnen im Untergrund nicht möglich.

Die Gebäudelasten werden in EED über monatliche Wärmebedarfe für Heizen und Kühlen abgebildet [BLOCON, 2022]. Der TWW-Bedarf wird als Jahreswert vom Nutzer eingegeben [BLOCON, 2022]. Weitere Nutzereingaben sind Spitzenlasten für Heizen und Kühlen und deren Dauer für jeden Monat des Jahres sowie jeweils eine JAZ für Heizen, Kühlen und TWW [BLOCON, 2022]. Bezüglich der Abbildung der Wärmepumpe wird vereinfacht angenommen, dass sie durchgängig läuft, wenn Gebäudelasten vorliegen [BLOCON, 2021]. Die Spitzenlasten werden vereinfacht am Ende des ausgewählten Monats angesetzt [BLOCON, 2022]. Seit Version 4 können die Gebäudelasten auch durch Stundenwerte abgebildet werden, entweder über das Einlesen von Datenreihen des Nutzers oder über interne Umrechnung der Monatswerte in Stundenwerte [BLOCON, 2022].

Neben EED ist GeoSyst (in Koenigsdorff et al. [2004] als GEOSYS bezeichnet) ein weiteres analytisches Berechnungsprogramm, das die g-Funktionen nutzt [Koenigsdorff et al., 2004]. GeoSyst ist ein Werkzeug, das die Vorplanung von Gebäuden mit thermischer Bauteilaktivierung und Wärmepumpensystemen in Kombination mit Erdwärmesonden für die Einsatzzwecke Heizen und Kühlen unterstützt [Koenigsdorff et al., 2004]. Das Programm basiert auf dem Monatsbilanzverfahren in Anlehnung an DIN V 18599 für die Berechnung monatlicher Heiz- und Kühlbedarfe [Koenigsdorff, 2011]. Es berücksichtigt u. a. eine außenlufttemperaturabhängige Heizungsvorlauftemperatur [Koenigsdorff, 2011]. Für die vorliegende Arbeit wurde GeoSyst in Version 4.0 [Hochschule Biberach, 2006] herangezogen. Das wesentliche Ergebnis ist, neben den monatlichen Heiz- und Kühlbedarfen, die Mindestlänge der Erdwärmesonden, die mittels einer ausgewählten g-Funktion berechnet wird. Die Wärmepumpe wird intern über monatliche Arbeitszahlen sowie durch Nutzereingaben zum exergetischen Gütegrad, zur Übertemperatur des Heizkreislaufs und zur Temperaturspreizung des Geothermiekreislaufs abgebildet [Hochschule Biberach, 2006; Koenigsdorff et al., 2004]. TWW-Bedarfe

werden nicht berücksichtigt. Zusammenfassend ist GeoSyst ein Programm, das Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Anlagentechnik und Untergrund bei der Dimensionierung von geothermischen Quellenanlagen anhand von vereinfachten Rechenverfahren näherungsweise berücksichtigt. Jedoch wird die Wärmepumpe und ihr dynamisches Verhalten nicht ausreichend abgebildet. Innerhalb des Forschungsprojektes QEWS II (FKZ: 03ET1386A-G) sind die Erweiterungen von GeoSyst beschrieben, die in das Programm GeoSyst+ integriert sind. Neuerungen von GeoSyst+ sind u. a. die Abbildung von Grundwasserströmungen durch die Implementierung der bewegten Linienquelle (Infinite Moving Line Source = IMLS) (siehe [Van de Ven et al., 2021a]), die Abbildung von Grabenkollektoren mit näherungsweiser Berücksichtigung von Vereisung im Erdreich und die Abbildung von Anbindeleitungen [Karrer et al., 2020]. Im aktuell laufenden Nachfolgeprojekt QEWSplus (FKZ: 03EE4020A-H) soll GeoSyst+ u. a. bezüglich der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Erdwärmesonden, geothermieseitiger Auswirkungen von bivalenten und modulierenden Wärmepumpensystemen und Sensitivitätsanalysen weiterentwickelt werden [Van de Ven et al., 2021b].

Das Programm EWS ist ein hybrides analytisch-numerisches Simulationsprogramm speziell für Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder [VBI, 2012]. Ähnlich wie EED kann EWS für die Berechnung langfristiger Temperaturänderungen im Untergrund anhand von eingebrachten und entzogenen Energiemengen genutzt werden [Bockelmann et al., 2011]. Im Gegensatz zu EED können mit EWS zusätzlich dynamische Effekte wie Anfahrprozesse der Erdwärmesonden durch die instationäre Abbildung des Sondenfluids sowie Grundwassereinflüsse und die thermische Beeinflussung von Nachbarsonden in der Pro-Version berücksichtigt werden [Huber, 2021]. EWS bildet den Untergrund im Nahbereich um die Erdwärmesonde numerisch in 2D ab und nutzt die Finite-Differenzen-Methode sowie mehrere Simulationsbereiche mit unterschiedlichen Zeitschrittweiten [Huber, 2021; Koenigsdorff, 2011], wohingegen im entfernten Bereich analytisch mithilfe der g-Funktionen gerechnet wird [Koenigsdorff, 2011]. Die g-Funktionen werden für die Abbildung der gegenseitigen Beeinflussung von Erdwärmesonden und das Langzeitverhalten der Untergrundtemperaturen genutzt [Koenigsdorff, 2011]. Nachbarsonden werden vereinfacht mit der gleichen Sondenlänge und dem gleichen Wärmeentzug wie die simulierte Erdwärmesonde angesetzt [Huber, 2021]. Ergebnisse sind stündliche Entzugsleistungen sowie Vorlauf- und Rücklauftemperaturen von Erdwärmesonden [Huber, 2021].

Die Gebäudelasten werden in EWS über monatliche bzw. jährliche Wärmebedarfe für Heizen, TWW und Kühlen abgebildet [Huber, 2021]. In Abhängigkeit des Eingabemenüs bzw. Lizenztyps sind weitere Nutzereingaben möglich, wie z. B. tägliche Sondenlaufzeiten, Entzugsleistungen im Dauerbetrieb, die Anzahl der Dauerbetriebstage der Sonde Ende Februar, Wärmeleistungen bei Volllast und Teillast für den Heizfall sowie Wärmeleistungen für jeweils TWW und Kühlung, ohne Unterscheidung zwischen Teil- und Volllast [Huber, 2021]. Zur Abbildung der Wärmepumpe können je nach Eingabemenü entweder jeweils eine Leistungszahl für Heizung, TWE und Volllast sowie ein Energy Efficiency Ratio (EER) bei Kühlanwendungen oder temperaturabhängige Leistungszahlen bei $-5\,°C$, $0\,°C$, $5\,°C$, $10\,°C$ und $20\,°C$ eingegeben werden [Huber, 2021]. Zusätzliche Nutzereingaben in der Pro-Version sind die Heizleistung der Wärmepumpe bei $0\,°C$, die minimal mögliche Sondenrücklauftem-

peratur, die elektrische Leistungsaufnahme der Soleumwälzpumpe und die Heizleistung eines Spitzenlastkessels im Falle eines bivalenten Systems [Huber, 2021]. EWS nimmt unabhängig von der Soletemperatur oder der Heizungsvorlauftemperatur eine konstante Heizleistung der Wärmepumpe an [Huber, 2021].

Für die Berücksichtigung von Grundwasserströmungen sowie die Abbildung von dreidimensionalen Temperaturfeldern im Untergrund oder nachbarschaftlicher Beeinflussung geothermischer Quellenanlagen kommen Programme wie z. B. FEFLOW zum Einsatz [VBI, 2012]. Zusätzlich kann FEFLOW zur Planung von großen Erdwärmesondenfeldern zum Heizen und Kühlen sowie bei komplexen hydrogeologischen Verhältnissen eingesetzt werden. In diesen Fällen sind hydrogeologische Untergrundeigenschaften bezüglich des Wärmetransports und der saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund entscheidend. FEFLOW ist ein numerisch-analytischer Hybridansatz, erlaubt die Berechnung von Grundwasserströmungen sowie Massen- und Wärmetransportmechanismen samt Konvektion in porösen Medien anhand der Finite-Elemente-Methode (FEM) und beinhaltet integrierte Berechnungsansätze für Erdwärmesonden (Modell-im-Modell-Ansatz) [Diersch, 2014; van Treeck et al., 2020]. Im Gegensatz zu Programmen wie EED wird der Untergrund als 3D-Modell abgebildet. Für die Modellbildung und Anwendung von FEFLOW sind Expertenwissen und Erfahrungen erforderlich [Koenigsdorff, 2011]. Das impliziert einen hohen Arbeits-, Zeit- und Kostenaufwand [Koenigsdorff, 2011]. Dynamische Wechselwirkungen zwischen der geothermischen Quellenanlage und der Wärmepumpe können mit FEFLOW meist nicht oder nur indirekt abgebildet werden [Koenigsdorff, 2011]. Konstante Eingabeparameter, wie z. B. die Temperaturdifferenz zwischen Sondenvorlauf und -rücklauf oder die Wärmeleistung in den Untergrund, implizieren konstante Randbedingungen auf der Wärmepumpenseite [DHI-WASY, 2013].

Bei Einzelanlagen mit kleinen Nennleistungen werden in der Praxis vereinzelt auch vereinfachte Ansätze wie Tabellen- oder Handrechenverfahren benutzt. Das Berechnungsprogramm GEO-HAND^{light} bildet ein Handrechenverfahren ab, das ebenfalls g-Funktionen einsetzt [VBI, 2012]. Der Anwendungsbereich von GEO-HAND^{light} beinhaltet die Plausibilitätsprüfung von Simulationen geothermischer Quellenanlagen und die grobe Dimensionierung von Erdwärmesonden und Sondenfeldern zum Heizen und Kühlen in der Konzeptentwicklung und Vorplanung [Koenigsdorff, 2011]. Das Handrechenverfahren setzt den langfristig eingeschwungenen, quasi-stationären Zustand des Untergrunds voraus, der sich bei geothermischen Nutzungen erst nach mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten einstellt [Koenigsdorff, 2011]. Weitere Annahmen sind ein ausschließlich radialer Wärmetransport und keine thermische Beeinflussung von benachbarten Erdwärmesondenanlagen [Koenigsdorff, 2011]. GEO-HAND^{light} ist u. a. nicht für Erdwärmesonden kleiner als 30 m und richtungsabhängigen Grundwasserflüssen geeignet [Koenigsdorff et al., 2007]. Ab Version 3.0 ist ein Modell zur dynamischen Abbildung des Kurzzeitverhaltens der Erdwärmesonde integriert [Koenigsdorff u. Van de Ven, 2019]. Die Gebäudelasten werden als Überlagerung aus einer jährlichen Sinusschwingung und Spitzenlasten für Heizen und Kühlen approximiert [Koenigsdorff u. Kirschmann, 2007]. Die maximalen Spitzenlasten treten dabei zeitgleich mit der Amplitude der periodischen Jahresschwingung auf [Koenigsdorff et al., 2007]. TWW-Bedarfe werden nicht berücksichtigt. Die Wärmepumpe wird innerhalb von GEO-HAND^{light} nicht abgebildet

(siehe hierzu [Koenigsdorff u. Van de Ven, 2019]).

Durch die Modellbildung des Bodens bzw. der Erdwärmesonden, der Vielzahl an Nutzereingaben und der daraus resultierenden benötigten Fachkenntnis sowie anfallende Lizenzgebühren ist die Integration von EED, EWS oder FEFLOW in eine automatisierte Simulationskette mit Hürden verbunden. Demgegenüber könnte zukünftig eine Anbindung des vereinfachten und lizenzfreien Handrechenverfahrens GEO-HAND^{light} oder des Berechnungswerkzeugs GeoSyst+ an das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Mehrebenen-Planungswerkzeug sowie eine Kopplung an das in Kapitel 3.4 beschriebene Wärmepumpensystemmodell für den Einsatz in der Vorplanung untersucht werden.

Die Wärmebedarfe für Heizung und TWW sowie Kühlbedarfe sind hauptsächlich über monatliche Eingaben in den zuvor beschriebenen Berechnungswerkzeugen integriert. Stündliche Lastprofile sowie Gebäudeberechnungen oder -simulationen werden oft nicht genutzt. Darüber hinaus wird die Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Wärmebedarfen, thermischen Speichern, der Wärmepumpe und dem Untergrund in den Planungswerkzeugen nicht ausreichend berücksichtigt.

Neben den monatlichen bzw. jährlichen dem Untergrund entzogenen Energiemengen und den maximalen Spitzenlasten, beeinflusst der genaue zeitliche Verlauf der aus dem Boden entzogenen Leistung das Temperaturverhalten im umliegenden Untergrund [Koenigsdorff, 2011]. Die Kombination aus der Modellierung des Gebäudes, der Anlagentechnik und des Erdreichs ist für die Erzeugung eines Gebäudelastprofils und die Ermittlung der thermischen Beeinflussung des Anlagenbetriebs auf den Untergrund notwendig (vgl. [Sagerschnig et al., 2014]). Um Dynamiken zwischen Ober- und Untergrund abbilden zu können, ist der Einsatz von bidirektional gekoppelten Simulationen aus Untergrund- und Wärmepumpensystemmodellen oder Untergrund- und Gebäudesimulationsmodellen ein probates Mittel. In der Planungspraxis werden gekoppelte Simulationen von Erdwärmesonden- und vereinfachten Wärmepumpensystemmodellen jedoch selten genutzt.

Wärmepumpen werden in den Berechnungswerkzeugen für Erdwärmesonden stark vereinfacht abgebildet, u. a. über eine konstante Temperaturdifferenz zwischen Quelleneinund Quellenaustritt sowie über geschätzte Werte der JAZ, ohne ein spezielles Regelungsverhalten der Wärmepumpe sowie ohne die Berücksichtigung von thermischen Speichern oder einer individuellen Systemkonstellation. Zusätzlich sind kritische Auslegungsparameter wie z. B. die JAZ als Nutzereingaben implementiert. Die Eingabe der JAZ und nicht deren Berechnung oder Simulation birgt das Risiko die Wärmepumpe falsch abzubilden. Eine Über- oder Unterschätzung hat direkte Auswirkungen auf die ermittelten Temperaturen in den Sonden und die berechnete Sondenlänge, auf die Lasten, die dem Untergrund entzogen bzw. mit denen der Boden beaufschlagt wird sowie insbesondere auf Kostenabschätzungen. Für eine genauere Bestimmung der JAZ und die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Wärmepumpe und Erdwärmesonden sollten bereits im Dimensionierungsprozess Berechnungswerkzeuge für geothermische Quellenanlagen mit vereinfachten Wärmepumpenmodellen gekoppelt werden. So wird u. a. in Hein et al. [2016b] und Bucher et al. [2018] die Kopplung aus Untergrund-

und Wärmepumpenmodellen zur Abbildung des dynamischen Einflusses der Wärmepumpe auf die aus dem Untergrund entzogene Last empfohlen.

2.8.3. Wärmepumpenmodelle

In der Literatur existieren eine Vielzahl an Wärmepumpenmodellen. In diesem Abschnitt werden Sole-Wasser-Wärmepumpenmodelle betrachtet, die an Erdwärmesondenmodelle gekoppelt werden können. Die Wärmepumpenmodelle werden u. a. hinsichtlich deren Einsatzbereiche und Integrationsfähigkeit in das Mehrebenen-Planungswerkzeug der vorliegenden Arbeit analysiert.

Für Wärmepumpensimulationen werden i. d. R. Black-Box-Modelle verwendet [Ruschenburg et al., 2014]. Black-Box-Wärmepumpenmodelle bilden die Wärmepumpe u. a. auf der Grundlage von Herstellerkennlinien mit Hilfe von mathematischen Methoden ab, ohne die einzelnen Kältemittelkreislaufkomponenten und deren physikalisches Verhalten abzubilden. Der interne Wärmepumpenkreislauf ist somit unbekannt. Dennoch besitzen Black-Box-Modelle eine ausreichende Detailtiefe zur Abbildung der Wärmepumpeneffizienz sowie einen begrenzten Satz von Eingaben für die Modellparametrisierung [Ruschenburg et al., 2014].

Wärmepumpenmodelle können in folgende Kategorien unterteilt werden [Weck-Ponten et al., 2022]:

- Kennlinienmodelle (englisch: characteristic curve models)
- Modelle mit Gleichungsanpassungen (englisch: equation-fit models)
- Modelle mit Parameterschätzungen (englisch: parameter estimation-based models)
- Physikalische Modelle (englisch: physical models)

Kennlinienmodelle sind i. d. R. Black-Box-Modelle, bei denen alle Daten direkt aus dem Katalog des Herstellers entnommen werden können. Diese Modelle benötigen somit kein weiteres Programm und keine Messdaten zur Vorberechnung von Koeffizienten oder Parametern. Bei einem Kennlinienmodell wird zwischen den Prüfpunkten der Wärmepumpenherstellerkennlinien eines am Markt verfügbaren Geräts linear interpoliert. Deshalb sind Kennlinienmodelle nur innerhalb des Bereichs der gegebenen Testpunkte der Herstellerkennlinien gültig.

Wärmepumpenmodelle mit Gleichungsanpassungen approximieren Herstellerleistungskennfelder mit einer begrenzten Anzahl von Messpunkten über eine oder wenige Gleichungen mit mehreren unbekannten Koeffizienten. Die Koeffizienten müssen z. B. aus genormten Labortestergebnissen nach DIN EN 14511, aus Messdaten von Referenzwärmepumpen oder durch den Einsatz weiterer Programme hergeleitet werden. Die resultierenden Koeffizienten werden i. d. R. für Simulationen von Wärmepumpen übernommen, ohne den Bezug zu einem bestimmten Wärmepumpengerät eines Herstellers. Diese empirischen Modelle sind recht weit

verbreitet, da die benötigten Daten meist vorhanden sind und die Darstellung des internen Geräteverhaltens hinreichend genau ist [Haller et al., 2012].

Modelle mit Parameterschätzungen fassen die physikalischen Zusammenhänge der einzelnen Systemkomponenten durch Gleichungssysteme zusammen. Über verallgemeinerte Leistungskennfelder wird der interne Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe abgebildet. Die Kennfelder werden i. d. R. von zusätzlichen Berechnungsprogrammen erzeugt. Diese Modelle beschreiben die physikalischen Zusammenhänge der Komponenten besser und über einen größeren Bereich von Betriebsbedingungen als Modelle mit Gleichungsanpassung [Fisher u. Rees, 2005].

Physikalische Modelle werden verwendet, um die Wärmepumpenanlage oder ihre einzelnen Komponenten auf der Ebene des Kältemittelkreislaufs zu optimieren, wobei die Wärme- und Stoffübertragungsmechanismen der einzelnen Komponenten berücksichtigt werden [Afjei u. Dott, 2011]. Diese deterministischen Modelle verwenden physikalische Gleichungen zur Beschreibung der Komponenten und benötigen die detaillierten Geometrien der Komponenten als Eingangsparameter. Die benötigten Daten sind i. d. R. nicht in den Katalogen der Hersteller verfügbar und müssen durch Feldversuche geschätzt werden [Salvalai, 2012]. Physikalische Modelle werden i. d. R. nicht mit Modellen der Wärmequellenanlage oder Heizungsanlage gekoppelt, um das Gesamtsystem zu analysieren [Huchtemann, 2015].

Dynamiken wie z. B. das An- und Abfahrverhalten der Wärmepumpe können mit physikalische Modellen anhand der Gleichungssysteme der Einzelkomponenten detailliert abgebildet werden. Black-Box-Modelle bilden die Dynamiken nicht in der Detailtiefe ab, jedoch besteht die Möglichkeit, die Modelle durch analytische Zusammenhänge oder Faktoren zu erweitern und so die Dynamiken vereinfacht abzubilden.

In Abbildung 2.18 sind die Wärmepumpenmodelltypen qualitativ anhand des Detailgrads, Modellierungsaufwands, Informationsbedarfs und der Einsatzfähigkeit auf Quartiersebene eingeordnet. Rechenaufwand, Detailtiefe und die erforderliche Informationsdichte steigen mit der Komplexität der Modelle von Kennlinienmodellen über Modelle mit Gleichungsanpassungen und Parameterschätzungen bis hin zu physikalischen Modellen (White-Box-Modell). Daher eignen sich vor allem Kennlinienmodelle für die frühe Planungsphase und Quartierssimulationen, wenn das physikalische Verhalten der einzelnen Kältemittelkreislaufkomponenten nicht entscheidend ist.

Für die Dimensionierung von geothermischen Anlagen werden in Deutschland Betrachtungszeiträume von mehreren Jahrzehnten angesetzt [Koenigsdorff, 2011]. Für die Simulation solch langer Zeiträume sind Modelle mit geringer Komplexität und angemessenen Rechenzeiten erforderlich. In den bestehenden Planungswerkzeugen für Erdwärmesonden sind häufig keine Wärmepumpenmodelle integriert, welche die Anlageneffizienz anhand von Regelungsalgorithmen oder unterschiedlichen Temperaturniveaus abbilden. In manchen Fällen enthalten die Programme sehr vereinfachte Rechenansätze zur Beschreibung des Wärmepumpenverhaltens bzw. der JAZ.

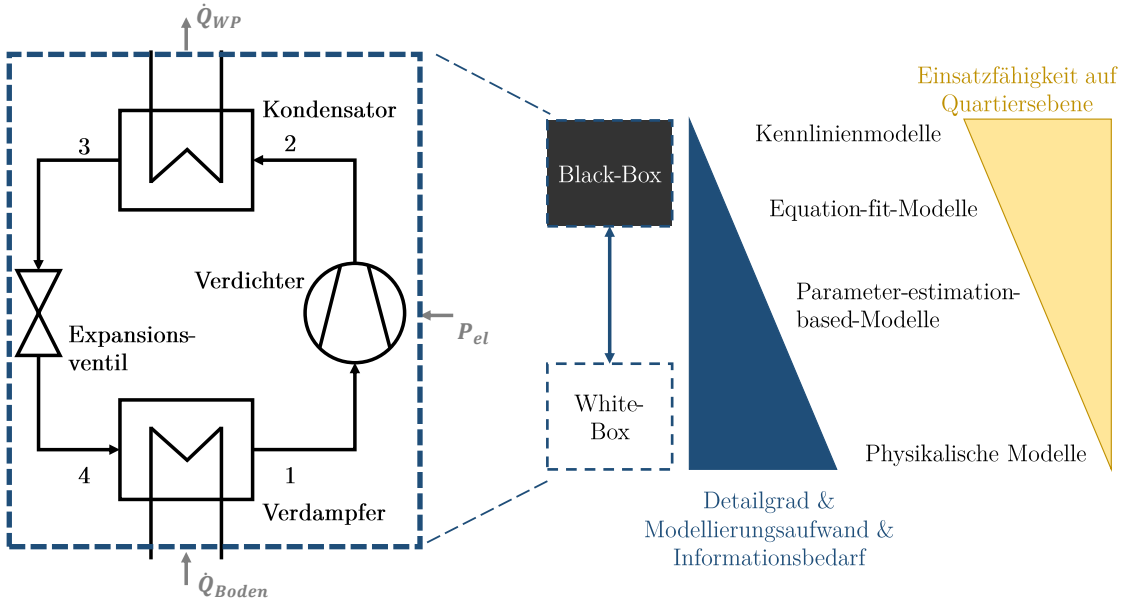


Abb. 2.18.: Einordnung der Wärmepumpenmodelltypen anhand des Detailgrads, Modellierungsaufwands, Informationsbedarfs und der Einsatzfähigkeit auf Quartiersebene

Oft sind Wärmepumpenmodelle innerhalb von thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen wie z. B. TRNSYS oder IDA ICE als quasi-stationäre Black-Box-Modelle ohne dynamische Effekte der Wärmeübertrager integriert [Afjei u. Dott, 2011]. Manchmal werden kurzzeitige instationäre Effekte wie die Vereisung oder Abtauung von Wärmeübertragern (insbesondere bei Luft-Wasser-Wärmepumpen) und die Berücksichtigung ihrer thermischen Trägheit implementiert. Meistens basieren die Modelle auf Gleichungsanpassungen oder Parameterschätzungen (siehe [Weck-Ponten et al., 2022]).

In thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen sind neben Wärmepumpenmodellen u. a. auch Modelle für thermische Speicher und Regelungsalgorithmen in Form von modularen Elementen enthalten. Deswegen sind innerhalb von Wärmepumpenmodellen i. d. R. keine Regelungsansätze oder Speicherbilanzen implementiert [Weck-Ponten et al., 2022]. Die Nutzung thermisch-energetischer Gebäudesimulationsprogramme ist mit großem Informationsbedarf und langen Rechenzeiten verbunden (siehe Abschnitt 2.8.1) und somit für die frühe Planungsphase und den Anwendungsbereich der vorliegenden Arbeit nur bedingt geeignet. Auf Wärmepumpenmodelle, die in thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen integriert und u. a. in Wetter u. Afjei [1996], Salvalai [2012] und Ruschenburg et al. [2014] beschrieben sind, wird im Folgenden nicht weiter eingegangen. Weiterführende Informationen zum Stand der Technik bestehender Wärmepumpenmodelle sind vom Autor in Weck-Ponten et al. [2022] beschrieben.

In Tabelle 2.4 wird eine Auswahl von Black-Box-Wärmepumpenmodellen aus der Literatur mit dem Fokus auf vereinfachte Kennlinienmodelle und Modelle mit Gleichungsanpassung vorgestellt. Die Modelle werden u. a. anhand des Modelltyps oder dessen Simulationsumgebung untereinander verglichen. Viele in der Literatur beschriebene Modelle lassen sich mittels

der gegebenen Informationen nicht eindeutig in die Modellkategorien einordnen. Dennoch können bei fehlenden Informationen Eigenschaften wie z. B. der Modelltyp meist anhand von anderen Informationen hergeleitet werden. Im Folgenden werden die Modelle aus Tabelle 2.4 beschrieben.

Tab. 2.4.: Eigenschaften und Funktionalitäten ausgewählter Wärmepumpenmodelle aus der Literatur (in Anlehnung an Weck-Ponten et al. [2022])

Referenz	Modell-typ	Programm/ Bibliothek	Kühlung	Einsatz auf Quartiersebene	Validiert
[Marti et al., 2009]	KM	Polysun	–	?	x
[Pasquier et al., 2013]	KM	MATLAB	x	–	?
[Hein et al., 2016a]	GA	OpenGeoSys	x	?	?
[Weiler et al., 2019]	GA	INSEL	(x)	x	?

GA = Gleichungsanpassung; KM = Kennlinienmodell; x = Ja; – = Nein; (x) = teilweise; ? = keine Informationen

In Hein et al. [2016a] wird die Integration eines vereinfachten Wärmepumpenmodells in das Untergrundsimulationsprogramm OpenGeoSys vorgestellt. Die Leistungszahl der Wärmepumpe wird über die Wärmequellenaustrittstemperatur als lineare Gleichung mit zwei zu ermittelnden Koeffizienten abgebildet [Hein et al., 2016a]. Diese werden für das Heizen mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C und für das aktive Kühlen mit 18 °C vorberechnet [Hein et al., 2016a]. Informationen bezüglich der Umschaltung zwischen Heizungsbereitstellung und TWE, daraus resultierende Unterschiede im Temperaturniveau und in der Leistungszahl sowie dafür notwendige Regelungsalgorithmen sind in Hein et al. [2016a] nicht enthalten.

Weitere Ansätze, in denen die Leistungszahl von der Wärmequellenaustrittstemperatur linear abhängt, werden auch in Marti et al. [2009], Pasquier et al. [2013] und Casasso u. Sethi [2014] mit Fokus auf Untergrund- und Wärmequellenanlagensimulationen verwendet. In Casasso u. Sethi [2014] ist die Implementierung einer linearen Gleichung zur Abbildung der Leistungszahl im Heizungsmodus in das Programm FEFLOW beschrieben.

In Pasquier et al. [2013] wird eine vereinfachte Approximation einer Wärmepumpe für die Einsatzzwecke Heizung und Kühlung vorgestellt, die in den Code eines Erdwärmesondenmodells in MATLAB integriert wurde. Die Leistungszahl wird anhand der implementierten Herstellerkennlinien und der Wärmequellenaustrittstemperatur linear interpoliert [Pasquier et al., 2013]. Ähnlich wie bei dem Modell aus Hein et al. [2016a] werden keine TWE und daraus resultierende Änderungen des Temperaturniveaus der Wärmesenke berücksichtigt. Modelleingaben sind u. a. die Leistungsdaten der Wärmepumpe sowie die Heiz- und Kühllasten des Gebäudes [Pasquier et al., 2013]. Als Ergebnis wird die Anzahl der zur Deckung der Gebäudelasten benötigten Wärmepumpen berechnet [Pasquier et al., 2013], wobei vereinfachend beliebige Kaskaden aus Wärmepumpen mit gleicher Nennleistung gebildet werden können.

In Marti et al. [2009] ist ein Wärmepumpenmodell beschrieben, das in das Anlagensimulationsprogramm Polysun integriert wurde. Aus einer angebundenen Datenbank können am Markt verfügbare Wärmepumpengeräte ausgewählt werden, denen jeweils Herstellerkennlinien zugeordnet sind [Marti et al., 2009]. Innerhalb der Prüfpunkte der Herstellerkennlinien sowie auf der Grundlage der Wärmequellenaustrittstemperatur und der Verrechnung mit dem Wärmepumpengütegrad[15] wird die Leistungszahl und die Heizleistung der Wärmepumpe linear interpoliert [Marti et al., 2009]. Auch zwischen Kennlinien unterschiedlicher sekundärseitiger Wärmepumpenaustrittstemperaturen wird interpoliert [Marti et al., 2009]. Das Wärmepumpenmodell kann innerhalb von Polysun mit einer dynamischen Erdwärmesondensimulation gekoppelt werden, die anhand des Algorithmus des Programms EWS implementiert ist [Marti et al., 2009].

In Weiler et al. [2019] wird ein vereinfachtes Modell für eine Luft-Wasser-Großwärmepumpe mit Gleichungsanpassungen vorgestellt, welches mit einer stündlichen Zeitschrittweite rechnet und für Quartierssimulationen geeignet ist. Das Modell ist innerhalb der Simulationsumgebung Integrated Simulation Environment Language (INSEL) [Eicker u. Schumacher, 2012; INSEL, 2022] integriert [Weiler et al., 2019]. Als Eingangsdaten benötigt das Modell neben Herstellerkennlinien u. a. stündliche Gebäudelasten und Wärmequellentemperaturen [Weiler et al., 2019]. Als Ergebnis werden stündliche und jährliche Werte für die Arbeitszahl und Heizleistung der Wärmepumpe berechnet [Weiler et al., 2019]. In Rezaei et al. [2021] wurde dieser Modellansatz zur Simulation von dezentralen geothermischen Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen auf Quartiersebene erweitert. Wie in Pasquier et al. [2013] wird die Anzahl der zur Deckung der Gebäudelasten benötigten Wärmepumpen berechnet [Rezaei et al., 2021]. Weiterführende Informationen zur Kopplung des Wärmepumpenmodells an ein Untergrundmodell oder zur Berechnung der stündlichen Wärmequellenaustrittstemperaturen sind in Rezaei et al. [2021] nicht enthalten.

Zusammenfassend sind insbesondere Kennlinienmodelle, in denen zwischen den Messpunkten der Herstellerkennlinien von am Markt verfügbaren Wärmepumpen linear interpoliert wird, für den Einsatz in frühen Planungsphasen und für Quartierssimulationen geeignet, da bei diesen Modellen alle notwendigen Informationen zur Berechnung der Leistungszahl, der Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe in Herstellerdatenblättern enthalten sind.

2.8.4. Konfiguratoren für Wärmepumpensysteme

Aufgrund der verschiedenen an der Planung geothermischer Systeme beteiligten Gewerke und der Vielzahl an Abhängigkeiten und notwendigen Informationen sind Systemkonfiguratoren hilfreich, mit denen das Gesamtsystem dimensioniert, die notwendigen Komponenten anhand von am Markt verfügbaren Geräten ausgewählt und Systemvarianten untereinander

[15] Der Wärmepumpengütegrad ist als das Verhältnis von realer zu idealer Leistungszahl definiert.

verglichen werden können. Im Folgenden werden Werkzeuge zur Konfiguration von Wärmepumpensystemen thematisiert.

Mithilfe des offenen Online-Wärmepumpenkonfigurators *Luft-Wasser-WP* [Holzheu, 2021] können Luft-Wasser-Wärmepumpen vereinfacht dimensioniert werden. Anhand von Schiebereglern kann der Nutzer u. a. die Heizgrenztemperatur, die Heizlast und Heizungsvorlauftemperatur bei 0 °C Außenlufttemperatur sowie die Wärmepumpennennleistung vorgeben. Dabei ist die Reglerspannbreite begrenzt und nicht durch den Nutzer anpassbar. Anhand der Eingaben werden verschiedene Ergebnisdiagramme angezeigt, u. a. Diagramme zu Heizgradtagen und zur zeitlichen Heizwärmebedarfsverteilung für den Standort Bayreuth sowie Diagramme zur außenlufttemperaturabhängigen Heizleistung der Wärmepumpe und Gebäudeheizlast. Zusätzlich wird der für die Wärmepumpe nutzbare PV-Stromertrag anhand der PV-Anlagennennleistung und dem Haushaltsstromverbrauch vereinfacht abgeschätzt und grafisch dargestellt. Das Wärmepumpensystem kann gegenüber einem Vergleichssystem bezüglich der jährlichen Energiekosten und THG-Emissionen analysiert werden. Als Vergleichssystem können ein Gas-Brennwertkessel, ein Öl-Brennwertkessel oder ein Öl-Niedertemperaturkessel gewählt werden. Der Konfigurator bietet eine nutzerfreundliche Oberfläche, jedoch ist er auf die Dimensionierung von Luft-Wasser-Wärmepumpen beschränkt. Darüber hinaus bildet das Web-Tool die Dimensionierung des Wärmepumpensystems stark vereinfacht ab, ohne die Dimensionierung von thermischen Speichern oder Investitionskosten bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

Weitere Werkzeuge, die Konfigurationen in einem gewissen Detailgrad ermöglichen, jedoch keine detaillierte Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme erlauben oder auf andere Anwendungen wie z. B. Wärmenetze, zentrale Erzeugerstrukturen, Erzeugerstrukturoptimierung oder energetische Gebäudesanierung auf Quartiersebene ausgerichtet sind, sind u. a. Sophena (Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen) [Sophena, 2022], *nPro* [nPro, 2022; Wirtz, 2023], KomMod [Eggers, 2018] und D-ECA (District Energy Concept Adviser) [D-ECA, 2022; Erhorn-Kluttig et al., 2013; IBP, 2018].

Dagegen ermöglichen Anlagensimulationsprogramme wie z. B. Polysun die Systemkonfiguration von Heizungssystemen auf der Grundlage von integrierten Komponentendatenbanken [Marti et al., 2009]. Polysun wurde hauptsächlich für Solaranlagen entwickelt und bietet die Möglichkeit, verschiedene Wärmepumpenanlagenkonfigurationen in Einzelgebäuden zu simulieren sowie untereinander energetisch und wirtschaftlich zu vergleichen [Vela Solaris AG, 2018]. Jedoch werden dem Nutzer wenige Hilfestellungen gegeben, sodass der Anwenderkreis hauptsächlich auf Simulationsspezialisten begrenzt ist. Für Wirtschaftlichkeitsanalysen wird die Kapitaltwertmethode herangezogen [Vela Solaris AG, 2018]. Dabei sind die Komponentenpreise und deren Lebensdauern nutzerseitig zu ergänzen [Vela Solaris AG, 2018]. Zusätzlich können Sensitivitäten durch obere und untere Extremwerte für Energiepreissteigerungen und den Kalkulationszins analysiert werden [Vela Solaris AG].

Nachfolgend werden Systemkonfiguratoren und Dimensionierungswerkzeuge mit dem Fokus auf oberflächennahe geothermische Wärmepumpensysteme beschrieben und anhand deren

Einsatzfähigkeit innerhalb eines optimierten Planungsprozesses analysiert. In Tabelle 2.5 sind ausgewählte Konfiguratoren für Wärmepumpen exemplarisch aufgelistet.

Tab. 2.5.: Eigenschaften und Funktionen ausgewählter Wärmepumpenkonfiguratoren

Referenz	Programm	GTQ	W	THG	MVK	MK
[GeoTsol, 2021]	GeoT*Sol	x	x	–	x	–
[WPSoft, 2022]	WP-OPT	x	(x)	–	x	–
[Bockelmann et al., 2019]	WP*source*	x	(x)	x	–	–
[STIEBEL, 2022]	*Wärmepumpentool*	–	(x)	(x)	(x)	–

GTQ = Abbildung geothermischer Quellenanlagen; MK = Möglichkeit der Kopplung an Simulationsmodelle (z. B. Wärmepumpen-, Gebäude- oder Untergrundmodell); MVK = Daten von am Markt verfügbaren Wärmepumpen; THG = THG-Bilanzen (z. B. CO_2); W = Wirtschaftlichkeitsanalysen; x = Ja; – = Nein; (x) = teilweise; ? = keine Informationen

GeoT*Sol ist ein Anlagensimulationsprogramm, das die Konfiguration von Wärmepumpensystemen, u. a. mit Solaranlagen, Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Grundwasserbrunnen sowie Puffer- und TWW-Speichern, anhand von Komponentendatenbanken ermöglicht [GeoTsol, 2021]. Der Anwendungsbereich des Programms umfasst die Heizwärmebereitstellung und TWE für Wohngebäude [Gatzka u. Kölling, 2011]. Die Wärmepumpe ist anhand der Prüfpunkte der DIN EN 14511 modelliert [Gatzka u. Kölling, 2011]. Weitere Informationen zur Modellierung der Wärmepumpe sind in Gatzka u. Kölling [2011] oder GeoTsol [2021] nicht enthalten. In Gatzka u. Kölling [2011] wird lediglich eine dynamische Jahressimulation der Anlagentechnik mit einer Zeitschrittweite von sechs Minuten erwähnt. Das Programm beinhaltet zusätzlich die Eingabe von Sperrzeiten sowie die Unterscheidung zwischen mono- und bivalenten Wärmepumpenbetriebsweisen [GeoTsol, 2021]. Da der Code nicht einsehbar ist, sind keine weiteren Informationen bezüglich der Implementierung von z. B. Sperrzeiten oder Regelungsalgorithmen vorhanden. GeoT*Sol beinhaltet keine Systemkonfigurationsvorschläge für die Wärmepumpe oder Puffer- und TWW-Speicher [GeoTsol, 2021]. In der vorliegenden Testversion wird ein Standardspeicher für beide Typen vorgeschlagen, dessen Größe jedoch nicht mit Änderungen der Energiebedarfe oder Sperrzeiten variiert [GeoTsol, 2021]. Die Berechnung der Erdwärmesondenlänge erfolgt vereinfacht mittels der eingegebenen spezifischen Entzugsleistung nach VDI 4640 [GeoTsol, 2021]. Ein Erdwärmesondenmodell, das Temperaturverläufe über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten simuliert, den umgebenen Untergrund detailliert abbildet und die Beeinflussung von Erdwärmesonden untereinander berücksichtigt, ist in der vorliegenden Programmversion nicht eingebunden [GeoTsol, 2021]. Ergebnisse von GeoT*Sol sind u. a. die JAZ der Wärmepumpe, verschiedene Energiekennwerte, der solare Deckungsanteil, ein spezifischer Wärmepreis, Stromkosten und verschiedene Annuitäten (vgl.[GeoTsol, 2021]). Analysen von THG-Emissionen oder der Primärenergie, Systemvergleiche der verschiedenen Wärmepumpenbetriebsweisen untereinander, technisch und energetische Bewertungen bezogen auf ein Vergleichssystem sowie die Abbildung von Wärmepumpenkaskaden sind mit GeoT*Sol nicht möglich [GeoTsol, 2021].

Mit dem Programms WP-OPT können Wärmepumpen, in Kombination mit vereinfachten Berechnungen von monatlichen Wärmebedarfen für Heizung und TWW, dimensioniert und mittels einer grafischen Benutzeroberfläche wirtschaftlich anhand der Jahresgesamtkosten analysiert werden [WPSoft, 2022]. In der Demoversion 4.2.8 werden u. a. monovalente Sole-Wasser-Wärmepumpensysteme, TWW-Speicher, verschiedene Bodenschichten bei der Wärmequellendimensionierung, Sperrzeiten, ein Wärmepumpenstromtarif und die SCOP-Berechnung nach VDI 4650 berücksichtigt [WPSoft, 2022]. Mithilfe einer integrierten und vom Nutzer erweiterbaren Datenbank können bestimmte Planungsinformationen wie z. B. Eigenschaften von am Markt verfügbaren Wärmepumpengerätetypen aggregiert werden [Möbus, 2002, 2006]. Zusätzlich werden dem Nutzer Wärmepumpengeräte auf Grundlage der getätigten Eingaben vorgeschlagen und die geothermische Quellenanlage vereinfacht dimensioniert [Möbus, 2006]. Mithilfe eines Zusatzmoduls können solarthermische Anlagen in die Berechnungen einbezogen werden [Möbus, 2006]. Detaillierte geothermische Analysen der Wärmequelle, beispielsweise anhand von Untergrundtemperaturprofilen über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, sind nicht möglich [WPSoft, 2022]. Ähnlich zu den Programmen Polysun und GeoT*Sol sind u. a. THG- und Primärenergieanalysen oder Systemvergleiche zwischen den verschiedenen Wärmepumpenbetriebsweisen nicht möglich.

In Bockelmann et al. [2019] wird WP*source* vorgestellt, ein Vordimensionierungsprogramm für monovalente Wärmepumpen in Kombination mit verschiedenen Wärmequellensystemen. Das Werkzeug ist in Microsoft Excel implementiert und soll zur Vorauswahl, Gegenüberstellung, grundlegenden Bewertung und Vordimensionierung unterschiedlicher Wärmequellensysteme für Wärmepumpen eingesetzt werden [Bockelmann et al., 2019]. Der Anwendungsbereich beschränkt sich auf Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude [Bockelmann et al., 2021]. Für diese Gebäudearten wurden Typgebäudemodelle mit unterschiedlichen Baualtersklassen erstellt und diese samt beispielhafter Anlagentechnik mit dem Simulationsprogramm TRNSYS für das Referenzklima Potsdam simuliert [Bockelmann et al., 2019]. Andere Standorte in Deutschland werden über Korrekturfaktoren berücksichtigt [Bockelmann et al., 2019]. Diese TRNSYS-Vorsimulationen erfolgten mit dem TRNSYS-Wärmepumpenmodell Type 401 [Bockelmann et al., 2019]. Aus Produktkatalogdaten verschiedener Hersteller wurden für verschiedene Leistungsklassen gemittelte Wärmepumpenkennfelder erstellt [Bockelmann et al., 2019]. Anhand der Wärmepumpenkennfelder wurden die für das Modell benötigten biquadratischen Polynome bestimmt [Bockelmann et al., 2019].

Dem Autor der vorliegenden Arbeit liegt WP*source* in Version 1.1 sowie in Version 2.0 vor. Die Jahreswärmebedarfe für Heizung und TWW, Speicherverluste und Bodenkennwerte werden vom Nutzer u. a. über nutzflächenspezifische Kennwerte, Brennstoffbedarfe oder die Personenanzahl vorgegeben bzw. ausgewählt und über prozentuale Faktoren oder Temperaturkennwerte in Monatswerte umgerechnet. Zur Dimensionierung der Wärmepumpennennleistung gibt der Nutzer eine flächenspezifische Heizleistung an, aus der, in Kombination mit der Nettoraumfläche, die Heizleistung samt Zuschlag für die TWE berechnet wird. Als Nennleistung der Wärmepumpe wird der nächst größere ganzzahlige Wert angesetzt. Eine Auswahl von am Markt vorhandenen Speichertypen oder Wärmepumpen mit

den entsprechenden Nennleistungen bzw. Volumina ist in WP*source* nicht enthalten. Nach Bockelmann et al. [2019] werden monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpe anhand der idealisierten Wärmepumpenkennfelder, des Temperaturniveaus der Wärmequelle sowie der ermittelten Heizkurven und gemittelten monatlichen Vorlauftemperaturen berechnet. Die Monatsarbeitszahlen bilden die Wärmepumpe vereinfacht ab, ohne Berücksichtigung von fallspezifischen Kriterien wie z. B. Reglungsmechanismen und das Umschalten vom Heizungs- auf den TWW-Modus, Kaskaden oder Puffer- und TWW-Speicher. Die Entzugsarbeit des Wärmequellensystems wird anhand der monatlichen Energiebedarfe und Arbeitszahlen der Wärmepumpe berechnet [Bockelmann et al., 2019]. Anhand der Entzugsarbeit und den aus den TRNSYS-Vorsimulationen ermittelten Kennfeldern der geothermischen Quellenanlagentypen wird die Mindestgröße des Quellensystems abgeschätzt [Bockelmann et al., 2019].

Neben energetischen Kennwerten kann in WP*source* die Wirtschaftlichkeit der Systeme anhand der Annuitätenmethode in Anlehnung an VDI 2067 [2012] analysiert werden [Bockelmann et al., 2019]. Dabei werden die Kosten für die Wärmepumpe, für Erdarbeiten, Bohrungen, Wärmeübertrager, Verteilerschächte, Kosten für die Anbindung der geothermischen Quellensysteme sowie Kosten für die Planung und Genehmigungen berücksichtigt, jedoch keine wirtschaftlichen Förderungen, Preissteigerungen und Kosten für das Heizungsverteilsystem [Bockelmann et al., 2021]. Die Investitionskosten für die Wärmepumpen werden mit Hilfe einer Näherungsfunktion auf Basis von verschiedenen Herstellerdaten abgebildet [Bockelmann et al., 2019]. Für das Wärmequellensystem, Dienstleistungen sowie Erdarbeiten und Bohrungen werden gemittelte Kosten aus der Planungspraxis herangezogen [Bockelmann et al., 2019]. Eine fallbasierte und komponentenspezifische Kostenbetrachtung mit Berücksichtigung von unterschiedlichen Wärmepumpentypen, Puffer- und TWW-Speichervolumina, Systemvarianten wie z. B. Wärmepumpenkaskaden oder die Berücksichtigung von Anlagenzubehör wie Umwälzpumpen ist nicht enthalten. Nach Bockelmann et al. [2019] stammen die angesetzten Energiepreise und Investitionskosten aus dem Jahr 2017. Zusätzlich werden Wärmegestehungskosten berechnet. Ökologische Analysen sind in Form von Gegenüberstellungen der Primärenergiebedarfe und CO_2-Äquivalente integriert.

Zusammenfassend ist WP*source* ein vereinfachtes Excel-basiertes Werkzeug, das vorermittelte Kennwerte aus Simulationen nutzt, um die Dimensionierung von Wärmepumpen in Kombination mit verschiedenen Quellensystemen in der Vorplanungsphase zu unterstützen. Durch die Nutzung von gemittelten Kennwerten aus vorgelagerten Simulationen ist eine Anwendung des Werkzeugs nicht sinnvoll, wenn der Nutzer z. B. spezielle Wetterdatensätze nutzen oder Regelungsmechanismen und Randbedingungen untersuchen möchte, die sich von denen in den Vorsimulationen verwendeten Daten bzw. Berechnungslogiken unterscheiden. Bezüglich der Wetterdaten ist eine Verwendung von standortspezifischen TRY-Datensätzen des Deutschen Wetterdienstes, Zukunftswetterdatensätzen oder Extremwetterdatensätzen nicht möglich. Dadurch ist das Programm in seinem Anwendungsbereich limitiert und nicht beliebig auf andere Standorte übertragbar. Die Systeme werden energetisch und wirtschaftlich sowie bezüglich der THG-Emissionen und Primärenergie gegenübergestellt. Dabei sind jedoch keine herstellerspezifischen Systemkomponenten und deren Investitionskosten vom Nutzer auswählbar. Die Abbildung gegenseitiger dynamischer Abhängigkeiten in der Dimen-

sionierung von Wärmepumpe und Quellenanlage sowie auf den Anwendungsfall angepasste Speicherdimensionierungen sind in WP*source* nicht enthalten.

Der webbasierte Konfigurator *Wärmepumpentool* des Herstellers STIEBEL ELTRON ermöglicht die Vordimensionierung der herstellereigenen Wärmepumpengeräte, Energiekosten-, Primärenergie- und THG-Emissionsvergleiche zwischen dem Wärmepumpensystem und einer Gas- bzw. Ölheizung und liefert verschiedene Ergebnisse bezüglich der Erzeugerenergiebereitstellung der Wärmepumpe. Die Analysen basieren auf vereinfachten Bilanzen und statischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Der Nutzer kann Sole-Wasser-Wärmepumpen auswählen, jedoch werden Erdwärmesonden oder andere geothermische Quellenanlagen nicht simuliert oder berechnet. [STIEBEL, 2022]

Die Anwendungsbereiche, Detailtiefen und der Fokus der beschriebenen Werkzeuge variieren mit den verschiedenen Applikationen. Einige Werkzeuge ermöglichen die Dimensionierung bzw. Konfiguration der Wärmepumpen samt Auswahl aus Komponentendatenbanken. Notwendige Hilfestellungen, wie z. B. auf Gebäudelasten und -energiebedarfe oder sonstige Randbedingungen angepasste Systemvorschläge für die Wärmepumpe, Puffer- und TWW-Speicher, sind selten Bestandteil der beschriebenen Werkzeuge. Wirtschaftlichkeitsanalysen oder energetische und klimarelevante Bewertungen wie z. B. THG- oder Primärenergiebilanzen werden innerhalb der Konfiguratoren meist sehr vereinfacht betrachtet bzw. nicht berücksichtigt. Anlagensimulationsprogramme wie z. B. GeoT*Sol oder Polysun kombinieren die Simulation und Konfiguration der Wärmepumpe, jedoch ist bei diesen Programmen die Anbindung an eine Werkzeugkette und die Kopplung an bestehende Untergrund- oder Gebäudemodelle aufgrund von Lizenzgebühren und nicht freigegebenem Quellcode mit Hürden verbunden. Insgesamt beschränken sich die beschriebenen Systemkonfiguratoren auf den Einzelgebäudebereich. Die zuvor beschriebenen Konfiguratoren eignen sich aufgrund von fehlenden Schnittstellen, dem auf Einzelgebäude zugeschnittenen Einsatzbereich und zu geringen Detailtiefen nicht für die Abbildung eines optimierten, gewerkeübergreifenden und ganzheitlichen Planungsprozesses geothermischer Wärmepumpensysteme.

2.8.5. Planungsprozesse und Werkzeugketten

Die zuvor beschriebenen Werkzeuge bilden einzelne Planungsbereiche bzw. die Kombination von Teilbereichen ab, jedoch nicht den ganzheitlichen Planungsprozess geothermischer Wärmepumpensysteme. In Tabelle 2.6 sind Beispiele simulationsbasierter Prozesse geothermischer Systeme und die Funktionalitäten der eingesetzten Werkzeugketten aufgelistet.

Beispielsweise ermöglicht das Anlagensimulationsprogramm Polysun eine Systemkonfiguration, Wirtschaftlichkeitsvergleiche und die kombinierte Simulation der Heizungsanlage samt Erdwärmesonden im Einzelgebäudebereich. Dafür werden u. a. eine integrierte Komponentendatenbank und ein mathematisches Teilmodell für Erdwärmesonden in Anlehnung an das Berechnungsprogramm EWS genutzt [Vela Solaris AG, 2018] (vgl. Abschnitt 2.8.4). Jedoch sind keine GIS-basierten geothermischen Standortanalysen, Quartierssimulationen oder die

Tab. 2.6.: Eigenschaften und Funktionalitäten ausgewählter simulationsbasierter Planungsprozesse für geothermische Wärmepumpensysteme und deren Werkzeugketten

Referenz	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
[Vela Solaris AG, 2018]	–	–	x	(x)	x	x	–	x	x	x	–
[De Rosa et al., 2015; Fisher u. Rees, 2005; Ruschenburg et al., 2014]	–	–	(x)	(x)	x	x	–	x	x	x	–
[Hein et al., 2016a]	–	–	–	(x)	–	x	–	(x)	x	x	–
[Hirsch et al., 2019; Sagerschnig et al., 2014; Welsch et al., 2017]	–	–	–	–	–	x	–	x	x	x	–
[Rezaei et al., 2021]	–	–	–	x	–	–	x	(x)	–	–	–
[Bernardi et al., 2019; Cheap-GSHPs, 2023]	–	(x)	(x)	x	(x)	(x)	?	(x)	x	–	–

A = Abbildung des gesamten Planungsprozesses (Genehmigung, Standortanalyse, Dimensionierung, Modellierung und gekoppelte Simulationen); B = GIS / geothermische Standortanalyse und Restriktionen des Genehmigungsprozesses; C = Systemkonfiguration (Dimensionierung der Einzelkomponenten samt Hilfestellungen anhand von am Markt verfügbarer Komponenten); D = Wirtschaftlichkeitsanalysen; E = THG-Bilanzen (z. B. CO_2); F = Einsatz auf Einzelgebäudeebene; G = Einsatz auf Quartiersebene; H = Modellierung der TGA (Wärmepumpe, thermische Speicher etc.); I = Modellierung des Untergrundes; J = Gekoppelte Simulationen von Ober- und Untergrund; K = Abbildung von thermischen Wechselwirkungen zwischen benachbarten Erdwärmesonden; x = Ja; – = Nein; (x) = teilweise; ? = keine Informationen

Berechnung thermischer Auswirkungen des Anlagenbetriebs auf benachbarte Erdwärmesondenanlagen oder Nachbargrundstücke möglich.

Die Erweiterung von thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen wie z. B. IDA ICE, EnergyPlus oder TRNSYS mit Modellen für geothermische Quellenanlagen (siehe u. a. [De Rosa et al., 2015; Fisher u. Rees, 2005; Ruschenburg et al., 2014]), die Integration von vereinfachten Wärmepumpenmodellen in numerische Untergrundmodelle (siehe u. a. [Hein et al., 2016a]) sowie bidirektionale Co-Simulationen von Untergrund- und Wärmepumpen- bzw. Anlagentechnikmodellen (siehe u. a. [Hirsch et al., 2019; Welsch et al., 2017]) oder von Untergrund- und Gebäudemodellen (siehe u. a. [Sagerschnig et al., 2014]) können die dynamischen Abhängigkeiten zwischen Ober- und Untergrund abbilden. Jedoch können solche Ansätze u. a. aufgrund des fehlenden Einbezugs von geothermischen Standortanalysen und Randbedingungen des Genehmigungsprozesses die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme nicht ganzheitlich abbilden.

In Rezaei et al. [2021] wird eine Werkzeugkette zur Berechnung von geothermischen Wärmepumpensystemen und PV-Anlagen auf Quartiersebene vorgestellt. Die Werkzeugkette enthält eine automatisierte Gebäudemodellerstellung anhand von CityGML-Daten, eine Gebäudeenergiebedarfsberechnung mithilfe der Software EnergyPlus und eine Anlagendimensionierung mit der Simulationsumgebung INSEL [Rezaei et al., 2021]. Zur Simulation von Wärmenetzen wurde ein MATLAB-Modell mit einem Newton-Solver auf der Grundlage von

Methoden der Graphentheorie implementiert [Rezaei et al., 2021]. Die Wärmepumpen werden vereinfacht modelliert (siehe Abschnitt 2.8.3), indem in jedem Zeitschritt die Anzahl an taktenden Wärmepumpen berechnet wird, die zur Deckung der Heizwärme- bzw. Kühllasten benötigt werden [Rezaei et al., 2021]. Dabei wird eine Abhängigkeit der Wärmequellenaustrittstemperatur von der Außenlufttemperatur angenommen [Rezaei et al., 2021]. Eine Beschreibung des dahinterstehenden Berechnungsansatzes bzw. der Modellierung der Erdwärmesonden oder des Untergrunds ist in Rezaei et al. [2021] nicht enthalten. Dieselbe Werkzeugkette wird ohne die Wärmenetzberechnung auch in Samadzadegan et al. [2021] für eine weitere Studie am gleichen Beispielquartier genutzt, in der dezentrale Sole- und Luft-Wasser-Wärmepumpen miteinander verglichen werden. Auch hier werden die geothermischen Quellenanlagen nicht modelliert und die Wärmepumpen stark vereinfacht dimensioniert und berechnet. Insgesamt wird ein sehr vereinfachter Ansatz zur Dimensionierung von geothermischen Systemen beschrieben, der Anlagentechnikkomponenten wie thermische Speicher nicht berücksichtigt, bei dem die Wärmepumpen sehr vereinfacht modelliert sind und der keine Hilfestellungen für die Konfiguration des Wärmepumpensystems beinhaltet. Zusätzlich sind keine Simulationen der Erdwärmesonden oder des Untergrunds angebunden. Somit werden dynamische Wechselwirkungen zwischen Erdwärmesonden und den Wärmepumpen sowie die thermische Beeinflussung von Erdwärmesonden untereinander nicht abgebildet.

Weitere Werkzeuge und Werkzeugketten, die nur bestimmte Teilprozesse der Planung geothermischer Wärmepumpensysteme und nicht den kompletten Planungsprozess berücksichtigen, auf Anwendungen wie z. B. Wärmenetze und die Betrachtung von Stadtraumtypen ausgerichtet sind oder notwendige Simulationen für Ober- und Untergrund nicht beinhalten, sind u. a. THERMOS [Kuriyan u. Shah, 2019; THERMOS, 2022; Thumim, 2021], die *Hotmaps Toolbox* [Hotmaps, 2023], das *Cheap-GSHPs Decision Support Tool* [Bernardi et al., 2019; Cheap-GSHPs, 2023] und ein Excel-basiertes Werkzeug aus dem Projekt UrbanReNet (FKZ: 0327832E) [Hegger et al., 2015].

Zudem sind in der Literatur zahlreiche Werkzeugketten beschrieben, die teilweise in der frühen Planungsphase und auf Quartiersebene eingesetzt werden können, u. a. Gebäudelastkurven erzeugen und TGA-Komponenten simulieren, jedoch keine geothermischen Systeme abbilden (u. a. [Bollinger u. Evins, 2015; Nouvel et al., 2015; Ntimos u. Purshouse, 2018; Stickel et al., 2019]). In vielen betrachteten Studien ohne direkten Bezug zu geothermischen Systemen werden mehrere Werkzeuge nacheinander genutzt, um einen spezifischen Anwendungsfall vorzustellen, jedoch ohne eine voll-gekoppelte Werkzeugkette aufzubauen (siehe z. B. [Ali-Toudert u. Ji, 2019; Siraganyan et al., 2019]), an die beispielsweise Wärmepumpen- bzw. Untergrundsimulationen angebunden werden können.

Derzeit sind keine ganzheitlichen und gewerkeübergreifenden Planungswerkzeuge bzw. Werkzeugketten zur Dimensionierung von thermischen Energiesystemen mit oberflächennahen geothermischen Quellensystemen in der Literatur beschrieben, die sowohl im Einzelgebäude- und Quartiersbereich einsetzbar sind, als auch eine detaillierte Anlagendimensionierung mit GIS-basierten Informationen des Antrags- und Genehmigungsprozesses sowie Wirtschaftlichkeits- und Ökologieanalysen miteinander kombinieren.

3. Mehrebenen-Planungsansatz für geothermische Wärmepumpensysteme

In diesem Kapitel wird ein simulationsbasierter Mehrebenen-Planungsprozess vorgestellt, der die ganzheitliche Planung geothermischer Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden auf den Skalen von Einzelgebäuden bis auf Quartiersebene in den frühen Planungsphasen ermöglicht. Zur Demonstration des geschlossenen Planungsprozesses wurde das simulationsbasierte Mehrebenen-Planungswerkzeug **PlanGeoWP** prototypisch implementiert. In Abbildung 3.1 sind die enthaltenen Werkzeuge und Applikationen von PlanGeoWP sowie deren Zusammenhänge dargestellt. Der Fokus von PlanGeoWP liegt auf der ganzheitlichen Dimensionierung des Wärmepumpensystems bestehend aus Wärmepumpen, thermischen Speichern und geothermischer Quellenanlagen.

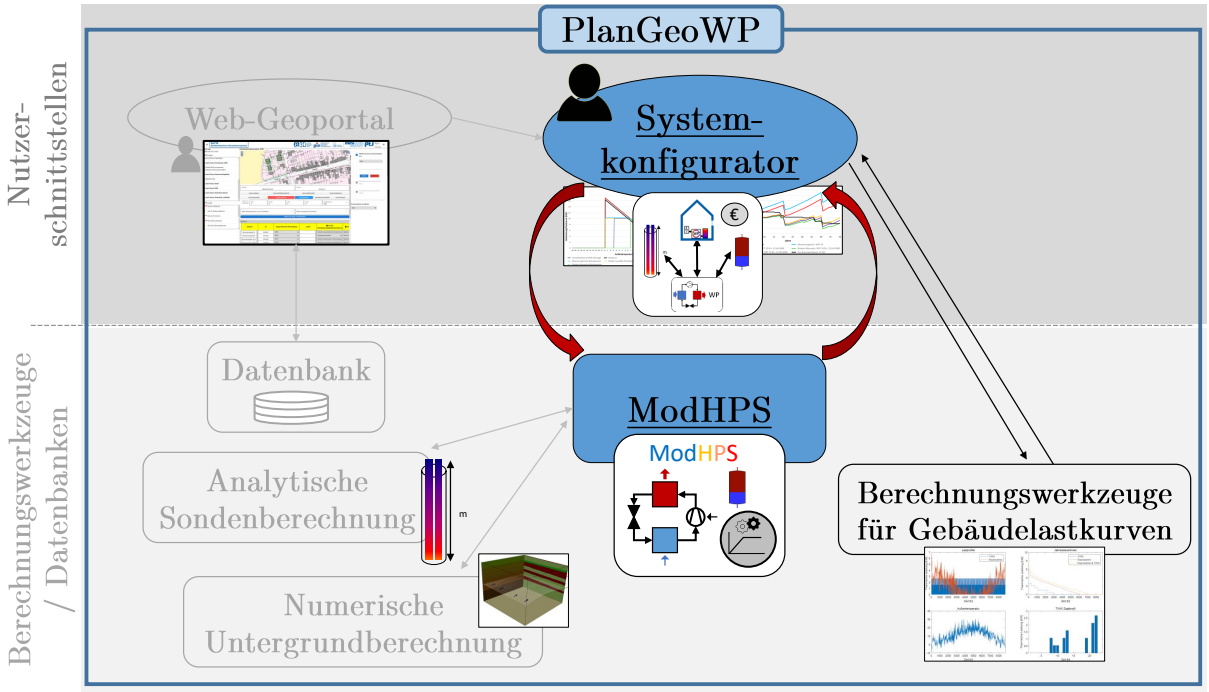


Abb. 3.1.: Schematische Darstellung der in PlanGeoWP enthaltenen Applikationen und deren Zusammenhänge (ausgegraut: Werkzeuge, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen.)

Die zentralen Elemente der vorliegenden Arbeit sind ein Systemkonfigurator und das Wärmepumpensystemmodell **ModHPS** (Model for Heat Pump Systems) [ModHPS, 2022; Weck-Ponten et al., 2022] inklusive der Abbildung von thermischen Speichern und verschiedenen Regelungsalgorithmen. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten und implementierten Werkzeuge bilden den Kern des Dimensionierungsprozesses geothermischer Wärmepumpensysteme und werden detailliert in den Abschnitten 3.4 und 3.5 beschrieben. Zur Bestimmung von stundengenauen Gebäudelastkurven und Jahresenergiebedarfen für Heizung und TWW wurden bestehende Berechnungswerkzeuge genutzt, teilweise erweitert und für die Integration in PlanGeoWP angepasst. Die Berechnungswerkzeuge zur Erzeugung von Gebäudelastkurven werden nach Bedarf vom Systemkonfigurator aufgerufen und sind in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Die ausgegrauten Applikationen in Abbildung 3.1 stehen nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und wurden vom Autor dieser Arbeit nicht entwickelt, jedoch innerhalb des Projektes **GeTIS** – *Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene* (FKZ: 03ET1357A) [van Treeck et al., 2020] teilweise mitgestaltet. Darunter fallen Erdwärmesonden- und Untergrundmodelle[1], die an ModHPS gekoppelt werden können sowie ein webbasiertes Geoportal mit angebundener Datenbank. Durch die Implementierung von Schnittstellen zu den Untergrundmodellen und zum webbasierten Geoportal samt Datenbank wird die Zusammenführung der Planungsebenen Standortanalyse, Gebäude, Heizungstechnik, Wärmequellensystem und Untergrund erreicht.

3.1. Anforderungen, Einsatzbereich und Zielgruppen

Für die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme sind u. a. die Ermittlung von Gebäudeenergiebedarfen, Lastprofilen und die Abbildung der Systemeffizienz erforderlich. Je detaillierter diese Größen berechnet werden, desto größer ist die Ergebnisgenauigkeit, jedoch auch der Planungsaufwand und die Kosten. Aufgrund der geringen Informationsdichte auf Stadtquartiersebene und der in der vorliegenden Arbeit betrachteten frühen Planungsphasen werden innerhalb von PlanGeoWP Simulations- und Berechnungsansätze mit wenigen Eingabeparametern zur Ermittlung der Bedarfe und Lastkurven für Heizwärme und TWW sowie zur Abbildung der Wärmepumpen und thermischen Speicher verwendet. Die Wärmepumpe soll detaillierter als in den gängigen Berechnungsprogrammen für geothermische Quellensysteme abgebildet werden, da der Wärmepumpenbetrieb maßgeblich die JAZ und damit die Wirtschaftlichkeit, Ökologie und Einsatztauglichkeit des Gesamtsystems beeinflusst.

PlanGeoWP soll die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme simulationsbasiert unterstützen. Die Gebäudeberechnungen und ModHPS sollen vom Systemkonfigurator mittels einer strikten Nutzerführung angesteuert werden. Das Ziel ist eine bedarfsgerechte und

[1] Erdwärmesondenmodelle, die das umgebene Erdreich vereinfacht mit abbilden sowie detaillierte Untergrundmodelle werden im Folgenden allgemein als Untergrundmodelle bezeichnet.

schnelle Berechnung der Simulationsergebnisse sowie deren weitere Nutzung im Konfigurator. Mithilfe von geeigneten Schnittstellen soll eine bidirektionale Kopplung zwischen ModHPS und Untergrundmodellen ermöglicht werden, sodass dynamische Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe, thermischen Speichern, der geothermischen Quellenanlage und dem Erdreich abgebildet sowie die thermische Beeinflussung von Erdwärmesonden untereinander und der Einfluss auf benachbarte Liegenschaften abgeschätzt werden können. Durch die Einbindung von teils komplexen Berechnungswerkzeugen werden, neben der Grundlagenermittlung und Vorplanung, teilweise auch die Entwurfsplanung und Genehmigungsplanung abgedeckt.

Für einen möglichst großen Anwendungsbereich von PlanGeoWP sollen der Systemkonfigurator und ModHPS u. a. die verschiedenen Wärmepumpenbetriebsweisen, die Integration von thermischen Speichern, die Einflüsse von unterschiedlichen primär- und sekundärseitigen Temperaturen auf die JAZ sowie die dazu benötigten Regelungsvarianten berücksichtigen. Der Einsatzbereich des Systemkonfigurators, von ModHPS und der Gebäudeberechnungswerkzeuge umfasst die Betrachtungsebenen Einzelgebäude, Gebäudegruppen und Stadtquartiere. Einerseits ist der Einsatzbereich von PlanGeoWP durch die integrierten Planungswerkzeuge und deren Anwendungsgebiete und Funktionen limitiert. Andererseits kann der Einsatzbereich durch die Erweiterung der bestehenden Werkzeuge oder die Einbindung weiterer Berechnungswerkzeuge erweitert werden. Grundsätzlich sind alle in der vorliegenden Arbeit betrachteten Werkzeuge zur Abbildung von Neubauten und Bestandsgebäuden geeignet.

Mögliche Anwender von PlanGeoWP könnten u. a. Ingenieurbüros und Fachplaner, aber auch Behörden wie geologische Dienste der Bundesländer sein, die etablierte und teilweise offene Web-Geoportale mit Informationen zur oberflächennahen Geothermie betreiben. An die Geoportale könnte die Werkzeugkette angeschlossen werden, um den Antrags- und Genehmigungsprozess zu unterstützen und zu erleichtern.

Machbarkeitsstudien für gebäudeübergreifende Energiekonzepte werden vor allem bei größeren Projekten oder in der kommunalen Wärmeplanung erstellt. Mithilfe von Web- und GIS-basierten Werkzeugen können ganze Stadtquartiere zukunftsweisend geplant und die gegenseitige Beeinflussung geothermischer Anlagen kartenbasiert visualisiert werden. Somit können neben den oben genannten Akteuren auch Entscheidungsträger wie Stadtwerke, Kommunen, Generalplaner oder Kontraktoren als Zielgruppe definiert werden. Diese weisen ein weniger spezialisiertes Fachwissen in den Bereichen TGA und TBA auf. Für diese Anwender ist eine Komplexitätsreduktion der Nutzerschnittstellen notwendig.

Aufgrund der unterschiedlichen Nutzergruppen und der Anforderungen an PlanGeoWP ist zwischen einem möglichst hohen Detailgrad zur Abbildung aller relevanten Einflussfaktoren und einer geringen Komplexität zur Einsatzfähigkeit in der Praxis abzuwägen.

3.2. Softwarekonzept und Planungsablauf

Die grundlegende Softwarearchitektur von PlanGeoWP ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Die abgebildeten Komponenten lassen sich in Werkzeuge, Datenbanken und in Dateiformate für die Datenübertragung unterteilen.

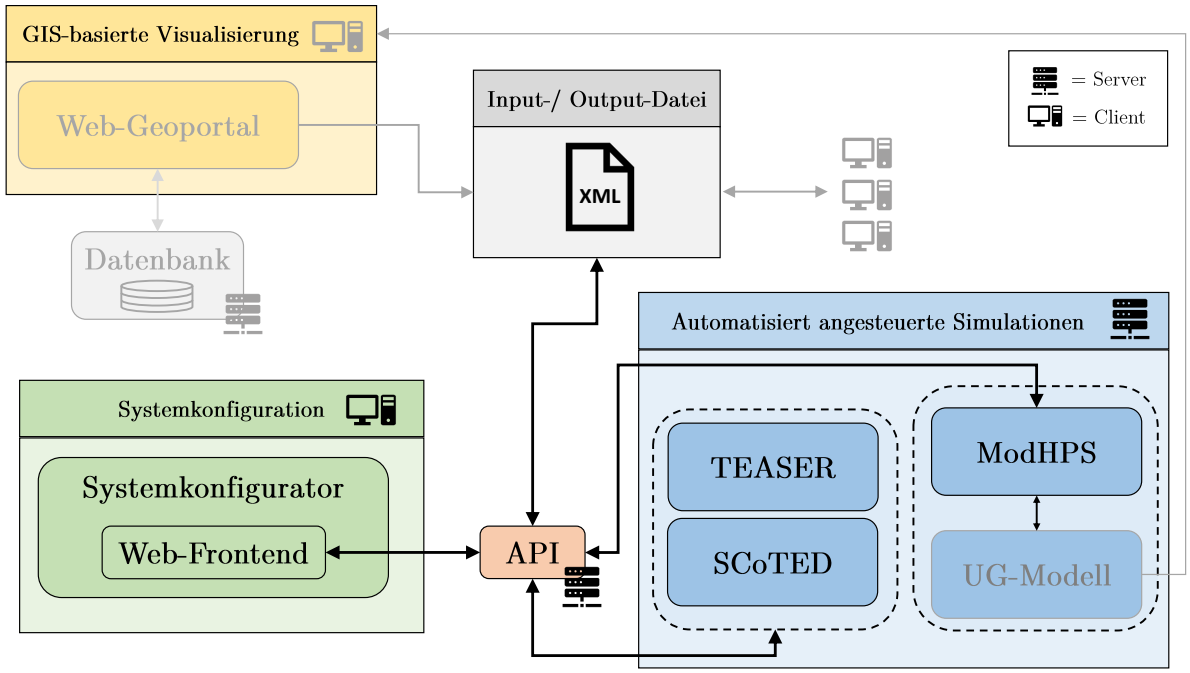


Abb. 3.2.: Schematische Darstellung der Softwarestruktur von PlanGeoWP (ausgegraut: Werkzeuge, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen.)

Zur Sicherstellung einer auf den Planungsprozess ausgerichteten, zentralen Datenaggregation, der Berücksichtigung von planungs- und genehmigungsrechtlichen Standortgegebenheiten wie z. B. der Darstellung von Wasser- oder Heilquellenschutzgebieten sowie der Einbeziehung der daraus entstehenden Restriktionen und Randbedingungen kann das in GeTIS entwickelte Web-Geoportal samt Datenbankanbindung genutzt werden. Durch eine standortunabhängige und großteils automatisierte Datenaggregation durch Web-Services ist zudem auch die Übertragbarkeit auf andere Regionen bei ausreichender Datenbasis sichergestellt. Die Datenbank enthält u. a. geologische und hydrogeologische Informationen des Projektstandortes von GeTIS, Herstellerdaten von Wärmepumpen- und Speichertypen sowie andere Daten, die nicht tagesaktuell durch Web-Services bezogen werden können. Alle im Geoportal aggregierten Datenkategorien sind in Weck-Ponten et al. [2018b] aufgelistet. Das Web-Geoportal, die angebundene Datenbank und die verwendeten Web-Services sind in van Treeck et al. [2020] genauer beschrieben.

Für die Datenübertragung zwischen dem Web-Geoportal, dem Systemkonfigurator und den Berechnungswerkzeugen wird das einheitliche Schnittstellendateiformat XML (Extensible Markup Language) genutzt. Alle in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Werkzeuge wurden so entwickelt, dass sowohl die Datenübertragung zwischen den Nutzerschnittstellen und

Berechnungswerkzeugen als auch die Übergabe von Ergebnisparametern zwischen den Werkzeugen untereinander anhand einer einheitlichen, vordefinierten XML-Struktur bewerkstelligt werden kann. Ein Beispiel der XML-Struktur ist im Anhang C.10 abgebildet.

Die XML-Datei kann an mehreren Stellen in die Werkzeugkette eingebracht werden. Standardmäßig wird die Muster-XML-Datei aus der Datenbank bezogen, im Geoportal mit planungsrelevanten Informationen angereichert und anschließend dem Systemkonfigurator zur Verfügung gestellt. Außerdem kann die XML-Datei auch von anderen Clients bezogen werden, ohne das Geoportal oder die Datenbank zu nutzen. Dazu können beispielsweise aus dem Systemkonfigurator exportierte und abgespeicherte XML-Dateien genutzt werden, die Projektinformationen einer früheren Konfiguration enthalten.

Der Systemkonfigurator ist die zentrale Benutzerschnittstelle zur Dimensionierung und Auswahl der Wärmepumpensysteme. Er basiert auf einem Client-Server-Modell und besteht aus einem Web-Frontend und einem Backend mit einer Programmierschnittstelle (API: Application Programming Interface) auf einem Server. Die API wird nach den Prinzipien des Architekturtyps REST (Representational State Transfer) (vgl. [Fielding, 2000]) implementiert. Als Kommunikationsprotokoll für die Web-Applikation wird HTTP (Hypertext Transfer Protocol) (vgl. [Fielding u. Reschke, 2014]) eingesetzt.

Der Import der XML-Datei wird im Web-Frontend des Systemkonfigurators angestoßen. Anschließend werden die XML-Datei über die API auf dem Server gespeichert, die Informationen aus der XML-Datei durch die API geparst und an das Frontend übertragen. Nach einer weiteren Datenanreicherung der übrigen für die Planung und Simulationen notwendigen Informationen im Systemkonfigurator wird die XML-Datei an die Berechnungswerkzeuge übertragen und mit Simulationsergebnissen gefüllt. Die Simulationsergebnisse können durch einen weiteren Import in den Systemkonfigurator zur Präzisierung der Konfiguration verwendet werden.

Zur Erzeugung von stundengenauen Lastkurven und zur Berücksichtigung unterschiedlicher Datengrundlagen sind in PlanGeoWP zwei Werkzeugtypen integriert. Zum einen wird das analytische Berechnungswerkzeug SCoTED [Koschwitz et al., 2016] angesteuert, das auf Wetterdaten und wenigen Eingabeparametern wie z. B. dem Energiebedarf oder der Normheizlast basiert. Zum anderen werden energetische Gebäudesimulationen eingesetzt, die mit dem Programm TEASER [Remmen et al., 2017] parametrisiert werden. Die zwei Gebäudeberechnungswerkzeuge werden in Abschnitt 3.3 näher erläutert.

Darüber hinaus sind bei der Planung Wechselwirkungen zwischen dem Wärmepumpenbetrieb und dem Untergrund zu berücksichtigen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ist eine Kopplung von Wärmepumpen- und Untergrundmodellen notwendig. Programmschnittstellen zwischen ModHPS und verschiedenen Untergrundmodellen sollen bidirektional gekoppelte Simulationen und die Abbildung von Dynamiken zwischen Untergrund und Wärmepumpenanlage ermöglichen.

Innerhalb des Forschungsprojektes GeTIS wurden zwei Untergrundmodelle entwickelt: ein analytisches Modell zur Vordimensionierung und schnellen Berechnung der Gesamterdwärmesondenlänge sowie *MPFluidGeTIS*, ein implizites, numerisches und auf Parallelisierung spezialisiertes 3D-Untergrundmodell mit einem Modell-im-Modell-Ansatz zur Abbildung von Erdwärmesonden sowie der Berücksichtigung von Grundwasserströmungen und der Möglichkeit, Temperaturfahnen zu berechnen (siehe [van Treeck et al., 2020]).

Zur Abbildung dynamischer Wechselwirkungen zwischen dem Wärmepumpensystem und dem Untergrund wurde ModHPS innerhalb von GeTIS bidirektional mit dem numerischen Untergrundmodell gekoppelt (siehe [van Treeck et al., 2020]). Für den schnellstmöglichen Datenaustausch und zur Vermeidung zusätzlicher Schnittstellen wurde der Programmcode von ModHPS in den Code der Untergrundsimulation integriert. Beide Modelle sind in der Programmiersprache C++ geschrieben, benötigen zur Ausführung keine weiteren Softwarelizenzen und setzen auf einen schnellen Datentransfer zwischen den Modellen. Die Modellkopplung ermöglicht die Berechnung von Temperaturänderungen im Untergrund unter Berücksichtigung von Grundwasserströmungen und der detaillierten Betriebscharakteristik des Wärmepumpensystems. Durch die Anbindung an das Geoportal können die resultierenden Temperaturfahnen im Untergrund GIS-basiert dargestellt, die gegenseitige thermische Beeinflussung von bestehenden und zukünftig gebauten Erdwärmesonden analysiert und die integrale Quartiersplanung und kommunale Wärmeplanung unterstützt werden. Durch eine zukünftige räumliche Verdichtung von geothermischen Systemen ist die Einbindung von Untergrundsimulationen, die die Temperaturverteilung im Untergrund abbilden können, bereits in frühen Planungsphasen sinnvoll.

Zur Überprüfung ausgewählter Entscheidungsparameter der Systemkonfiguration und zur Gewährleistung von kurzen Rechenzeiten soll ModHPS zukünftig an das analytische Untergrundmodell bidirektional gekoppelt und die gekoppelte Simulation innerhalb des Konfigurators automatisiert aufgerufen werden. Neben dem analytischen Untergrundmodell aus GeTIS könnten sich auch andere Werkzeuge mit kurzen Rechenzeiten wie z. B. GEOSYST+ oder GEO-HAND^{light} für eine Kopplung eignen.

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungsablauf ist in Abbildung 3.3 dargestellt und anhand der Nutzerinteraktionen bzw. eingesetzten Werkzeuge farblich aufgeteilt.

Die ersten Nutzerinteraktionen sind GIS-basiert und werden innerhalb des Web-Geoportals durchgeführt. Zu Beginn können planungsrelevante Standortinformationen wie z. B. Wasser- oder Heilquellenschutzgebiete, bestehende Bohrungen für Erdwärmesonden, Flurstücke oder Gewässer betrachtet werden.

Nach der Standortanalyse wählt der Nutzer die gewünschte Anzahl an Gebäuden aus der Katasterkartenansicht über GIS-basierte Markierungswerkzeuge aus oder platziert neue Gebäude. Die ausgewählten Gebäude werden als Objekte erstellt und der Großteil der planungsrelevanten Gebäudeinformationen über Web-Services, die Datenbank und weiteren Berechnungen aggregiert. Die Informationen können u. a. anhand von CityGML- und ZENSUS-Daten automatisiert bezogen werden. Das Baujahr der Gebäude ist dabei ein entscheidender

Parameter, der jedoch nicht gebäudespezifisch vorliegt. Deswegen besteht im Geoportal die Möglichkeit, das Baujahr auf der Grundlage von historischen Luftbildern oder Bebauungsplänen zu überprüfen. Der automatisierte Datenaggregationsprozess für die Gebäudeparameter ist in Weck-Ponten et al. [2018a] detailliert beschrieben.

Anschließend platziert der Nutzer Erdwärmesonden in die Kartenansicht, ordnet die Sonden den ausgewählten Gebäuden zu und gibt die fehlenden Sondeninformationen ein. Bei der Zuordnung zwischen Erdwärmesonden und Gebäuden ist jede Kombination möglich. Anschließend werden alle bisher eingegebenen und vom Geoportal aggregierten Daten in die XML-Datei geschrieben und diese zum Download angeboten. Neben Gebäude- und Sondeninformationen werden zusätzlich u. a. Wetterdaten des Standortes, hydrogeologische Informationen, Schichtprofile oder 3D-Untergrundmodelle aggregiert.

Innerhalb des Systemkonfigurators können alle weiteren für die Dimensionierung notwendigen Daten ausgewählt oder eingegeben werden. Bezüglich der Eingabe der Normheizlast und der Energiebedarfe des Gebäudes besteht die Möglichkeit, die Parameter anhand der Gebäudeberechnungswerkzeuge zu simulieren, bevor mit der Systemkonfiguration fortgefahren wird. In der Systemkonfiguration werden Systemvorschläge für Wärmepumpen, thermische Speicher und Erdwärmesonden erstellt und diese anhand von Systemvergleichen verschiedener Betriebsweisen bewertet. Die Dimensionierung des Gesamtsystems kann u. a. durch Parameteränderungen oder durch die Wahl anderer Wärmepumpen beliebig konfiguriert werden. Die auswählbaren gebäudetechnischen Komponenten basieren auf Herstellerinformationen und sind in einer separaten XML-Datei gespeichert.

Im nächsten Schritt kann die Wärmepumpenkonfiguration jeder Betriebsweise anhand von Simulationen überprüft werden. Dazu wird ModHPS aus dem Systemkonfigurator heraus aufgerufen. Vor dem ersten Aufruf sind gegebenenfalls die für die Wärmepumpensimulation notwendigen stündlichen Jahreslastkurven durch das Starten der Gebäudeberechnungswerkzeuge zu erzeugen. Alternativ zu einer bidirektionalen Kopplung von ModHPS an analytische oder semi-analytische Untergrundmodelle, kann ModHPS auch ungekoppelt ausgeführt werden. In diesem Fall wird die Wärmequellenaustrittstemperatur anhand von Randbedingungen abgebildet. Als Randbedingungen können z. B. aus Untergrundsimulationen exportierte Jahresverläufe, mit der Zeit abnehmende Werte oder ein konstanter Wert angesetzt werden.

Neben der Möglichkeit, die Ergebnisse der einzelnen Berechnungswerkzeuge in PDF-Form abzuspeichern, werden entscheidende Dimensionierungsparameter wie z. B. die simulierte JAZ oder Deckungsanteile an den Systemkonfigurator übergeben und für die Optimierung der Konfiguration genutzt. Bei Unterschieden zwischen der im Konfigurator berechneten Erdwärmesondenlänge und dem simulierten Wert einer gekoppelten Wärmepumpen- und Untergrundsimulation, kann die gewählte und für die Dimensionierung herangezogene Sondenlänge vom Nutzer angepasst werden. In diesen Fällen sollte der Nutzer die benötigte Anzahl an Sonden überprüfen und gegebenenfalls eine neue Sonde im Geoportal platzieren und parametrieren. Auf der Grundlage der neuen Daten oder Änderungen in der Konfiguration sollte der Simulationsprozess für diese Betriebsweise erneut gestartet werden. Mithilfe

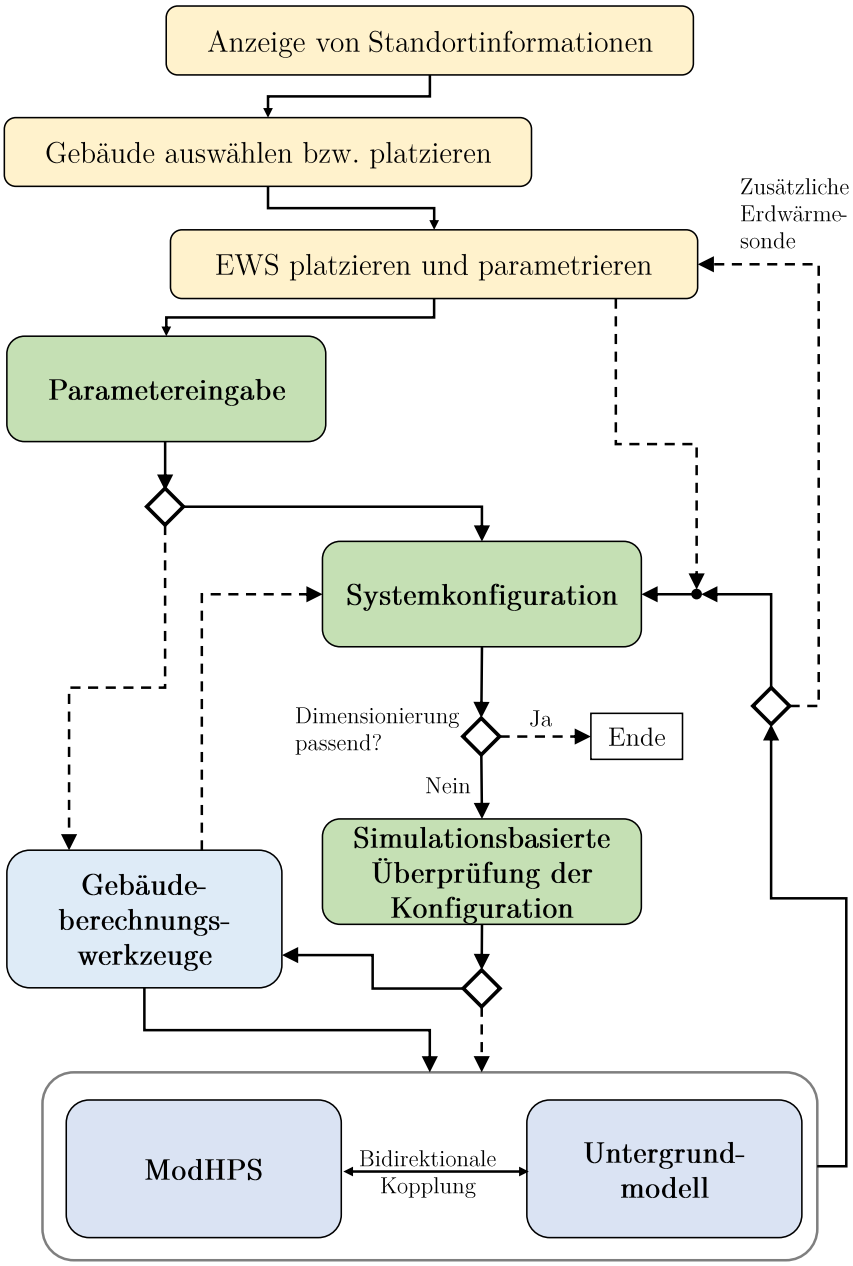


Abb. 3.3.: Schematischer Planungsablauf in PlanGeoWP (gelb: Aktionen im Web-Geoportal; grün: Aktionen im Systemkonfigurator; blau: Simulationsprozesse; gestrichelte Linien: alternative Pfade)

dieses iterativen Simulations- und Konfigurationsprozesses kann das System optimal dimensioniert werden.

Zusätzlich zu dem vorgestellten Planungsablauf können alle entwickelten Werkzeuge auch einzeln eingesetzt oder anders kombiniert werden. Nachfolgend werden die zentralen Werkzeuge sowie deren spezifische Anforderungen und Einsatzbereiche beschrieben.

3.3. Gebäudeberechnungswerkzeuge

In der Planungspraxis werden Energiebedarfe oder Heizlasten oft durch Ingenieurbüros abgeschätzt oder anhand vereinfachter Verfahren berechnet und in Form von monatlichen Werten für die Planung geothermischer Anlagen verwendet. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Genauigkeit der Wärmepumpensimulationen sind zeitlich hoch aufgelöste Gebäudelastkurven vorteilhaft. Aufgrund der Verfügbarkeit von Wetterdaten in stündlicher Form erscheinen auch Gebäudelastkurven mit Stundenintervallen als sinnvoll.

Zur Erzeugung der stundengenauen Jahreslastkurven für Heizung und TWW werden bestehende Werkzeuge genutzt, die wenige Eingabeparameter benötigen und kurze Rechenzeiten aufweisen, um die Anwendung auf Quartiersebene, den Einsatz innerhalb früher Planungsphasen und eine automatisierte Ansteuerung innerhalb von PlanGeoWP zu ermöglichen. Um unterschiedliche Datengrundlagen abbilden zu können, wurden zwei automatisiert ansteuerbare Berechnungsprozesse entwickelt und die dafür benötigten Werkzeuge angepasst, teilweise erweitert und in PlanGeoWP integriert:

1) Analytischer Berechnungsprozess mit SCoTED [Koschwitz et al., 2016] in drei Varianten:
   a) Normheizlast nach DIN EN 12831 und der TWW-Bedarf liegen vor
   b) Jahresenergiebedarfe bzw. -verbräuche für Heizung und TWW liegen vor, jedoch keine Normheizlast
   c) Sowohl die Normheizlast als auch der Jahresheizenergiebedarf bzw. -verbrauch für Heizung und TWW liegen vor
2) Parametrierung von Modelica-Gebäudemodellen niedriger Ordnung mit dem Programm TEASER [Remmen et al., 2017] in der Version 0.6.8 und automatisiert gestartete Simulation in Dymola [Dymola, 2022] sowie TWW-Lastkurvenerzeugung durch SCoTED

Unter Nutzung der vereinfachten Verfahren zur Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 Beiblatt 2 werden die Jahresenergiebedarfe bzw. die maximale Last in SCoTED anhand von stündlichen Außentemperaturen und weiteren Parametern, wie z. B. dem TWW-Anteil, der TWW-Zapfprofilart in Anlehnung an DIN EN 15450 oder der Normaußen- und Heizgrenztemperatur, gewichtet und auf jede Stunde des Jahres verteilt.

Im zweiten Berechnungsprozess werden Modelica-Typgebäudemodelle geringer Ordnung aus der AixLib-Bibliothek mit dem Programm TEASER anhand von statistischen Zusammenhängen und Literaturwerten mit Informationen angereichert und die Modelle mit weiteren Daten wie z. B. einem TRY-Wetterdatensatz parametriert. Dieser Prozess funktioniert insbesondere auf Quartiersebene bei einer Vielzahl an Gebäuden und benötigt nur wenige Eingabeparameter wie z. B. den Gebäudetyp, das Baujahr, die lichte Raumhöhe, die Geschossanzahl und die Nettogrundfläche. Die angereicherten Gebäudemodelle werden mit der kommerziellen Entwicklungsumgebung Dymola simuliert. Aus den Simulationsergebnissen

wird die stundengenaue Jahreslastkurve für Heizung extrahiert. Anschließend wird SCoTED zur Bestimmung der TWW-Lastkurve ausgeführt.

Liegen Verbrauchswerte für ein oder mehrere Gebäude vor, sollte für diese Gebäude der analytische Berechnungsprozess genutzt werden (siehe Abbildung 3.4), da innerhalb der Verbrauchsdaten das Nutzerverhalten berücksichtigt ist. Auf Stadtquartiersebene mit vielen Gebäuden und einer geringen Informationsdichte ist der zweite Berechnungsprozess vorteilhafter. Generell wird für jedes einzelne Gebäude der Berechnungsprozess festgelegt, sodass bei Gebäudegruppen oder Quartiersbetrachtungen auch alle Berechnungsvarianten zum Einsatz kommen können. Für jedes Gebäude werden Ergebnisdiagramme automatisiert in PDF-Form erzeugt und abgespeichert (siehe Abbildungen B.1, B.2 und B.3).

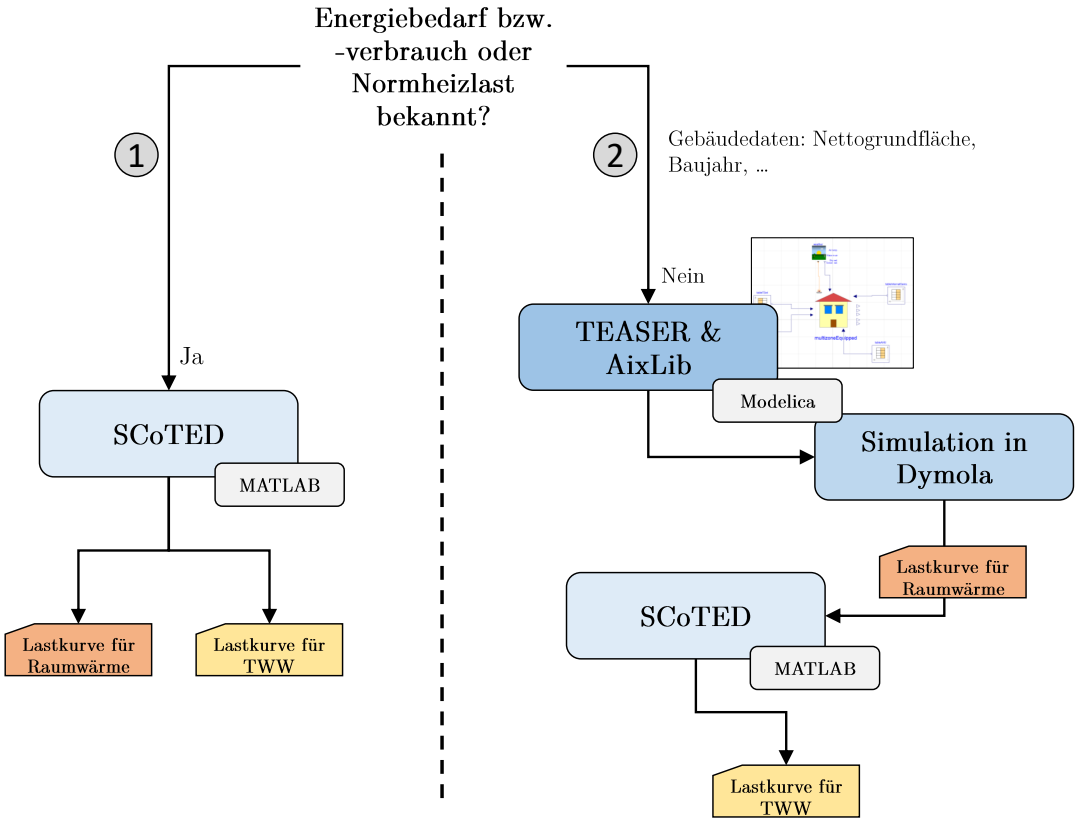


Abb. 3.4.: Schematische Darstellung der automatisiert ansteuerbaren Berechnungsprozesse für die Erzeugung der stundengenauen Gebäudelastkurven (1: Analytische Berechnung mit SCoTED; 2: Energetische Gebäudesimulation und SCoTED)

Die Eingangsparameter und die detaillierten Berechnungsmethoden für die verschiedenen Berechnungsvarianten, die teilweise automatisierte Datenaggregation und Vorberechnungen über das Geoportal, die gebäudespezifischen Parameterzusammenhänge sowie Zusammenhänge zwischen Gebäude- und Wärmepumpenparametern sind in Weck-Ponten et al. [2018a] und van Treeck et al. [2020] beschrieben.

Am Ende des Gebäudeberechnungsprozesses werden die erzeugten Jahreslastkurven automatisiert nachbereitet und in die XML-Datei gespeichert, sodass sie anschließend vom Sys-

temkonfigurator und von ModHPS eingelesen werden können. Bei der Nachbereitung der Heizwärmelastkurven können Randbedingungen wie die Heizgrenztemperatur und eine Sommerabschaltung berücksichtigt werden, die in der energetischen Gebäudesimulation nicht einbezogen wurden. Mithilfe eines Skriptes werden die Werte der Lastkurve überarbeitet, die von der jeweiligen Randbedingung tangiert werden. Die insgesamt drei Varianten der Heizwärmelastkurve sind in Abbildung B.4 gegenübergestellt. Im Falle der Sommerabschaltung werden alle Leistungswerte zwischen Anfang Mai und Ende September zu Null gesetzt. Bei der Berücksichtigung der Heizgrenztemperatur werden die Leistungswerte der Stunden genullt, die höhere Außentemperaturen als die eingegebene Heizgrenztemperatur aufweisen. Im analytischen Berechnungsprozess mit SCoTED ist die Heizgrenztemperatur ein notwendiger Eingabeparameter und wird deshalb ohnehin berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung der Nachbereitung der Lastkurven ist in van Treeck et al. [2020] enthalten.

3.4. Wärmepumpensystemmodell

In der Planungspraxis oberflächennaher geothermischer Quellenanlagen wird das Systemverhalten von Wärmepumpen, sofern keine Systemsimulation durchgeführt wird, meist vereinfacht über eine als konstant angenommene JAZ abgeschätzt und mit monatlichen Gebäudelasten verrechnet. Die Wärmepumpe beeinflusst durch ihren Betrieb und die Regelung maßgeblich die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Gesamtsystems. Deswegen sollte die JAZ bereits in frühen Planungsphasen möglichst präzise abgeschätzt werden. Dafür eignen sich gekoppelte Simulationen aus Untergrund- und Wärmepumpenmodellen. Außerdem sind für die Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme und die dafür erforderlichen langen Auslegungszeiträume Modelle mit geringer Komplexität und angemessener Rechenzeit vorteilhaft.

Im Gegensatz zu gängigen Planungswerkzeugen sollen die Wärmepumpe und deren Wechselwirkungen mit Gebäudewärmebedarfen, thermischen Speichern, geothermischen Quellenanlagen und dem umgebenden Untergrund detaillierter abgebildet werden. Dafür ist ein vereinfachtes und recheneffizientes Wärmepumpensystemmodell notwendig, das an Untergrundmodelle gekoppelt werden und die innerhalb von PlanGeoWP erzeugten stundengenauen Gebäudelasten verarbeiten kann. Im Folgenden wird das innerhalb der vorliegenden Arbeit entwickelte und auf den Planungsprozess von geothermischen Systemen angepasste Wärmepumpensystemmodell ModHPS beschrieben. ModHPS ist in der Programmiersprache C++ programmiert und kann durch die Integration von Speicherbilanzen und Regelungsansätzen als erweitertes Kennlinienmodell bezeichnet werden. Im Vergleich zu Modellen mit Gleichungsanpassungen oder Parameterschätzungen ist für ModHPS kein weiteres Programm zur Herleitung von Koeffizienten notwendig. Nahezu alle notwendigen Eingangsparameter sind in Herstellerdatenblättern enthalten. Der Quellcode von ModHPS steht quelloffen entsprechend der MIT-Lizenz[2] über `https://github.com/RWTH-E3D/ModHPS` zur Verfügung.

[2] https://github.com/RWTH-E3D/ModHPS/blob/master/LICENSE

3.4.1. Einsatzbereich und Anforderungen

Der Einsatzbereich von ModHPS umfasst folgende Konfigurationen und Funktionalitäten:

- Taktende Sole-Wasser-Wärmepumpen
- Monovalente und alle bivalenten Betriebsweisen
- Wärmepumpenkaskaden
- Sowohl Einzelgebäude als auch Quartierssimulationen mit einer Vielzahl an geothermischen Quellenanlagen und Wärmepumpen
- Abbildung unterschiedlicher Temperaturniveaus auf der Sekundärseite durch den Wechsel zwischen Heizungs- und TWW-Modus
- Abbildung von Puffer- und TWW-Speichern.
- Regelungsalgorithmen für alle Betriebsweisen, für Sperrzeiten und für die vereinfachte Abbildung der direkten geothermischen Kühlung

Die Funktionalitäten von ModHPS sind an die Funktionen des Systemkonfigurators und der gekoppelten Berechnungswerkzeuge angepasst. Der Systemkonfigurator nutzt Entscheidungsparameter wie z. B. Deckungsanteile und die JAZ für Systemvergleiche, Wirtschaftlichkeitsanalysen und ökologische Bewertungen. Durch die Simulation dieser Entscheidungsparameter innerhalb von ModHPS sowie deren Speicherung in die XML-Datei und Übergabe an den Systemkonfigurator kann die Systemkonfiguration mittels Simulationen überprüft werden.

ModHPS bildet Sole-Wasser-Wärmepumpen anhand von am Markt verfügbaren Wärmepumpengeräten spezifischer Hersteller ab. Bei der Kopplung von ModHPS an Systeme mit Wasser als Quellenmedium sind entsprechende Herstellerdaten wie z. B. die Herstellerleistungskennlinien und der Quellenvolumenstrom zu beziehen sowie die Dichte und Wärmekapazität des Quellenfluids anzupassen. ModHPS ist durch die Integration in PlanGeoWP auf die Kopplung mit Erdwärmesonden- und Untergrundmodellen spezialisiert. Generell kann ModHPS auch mit Wärmenetzmodellen oder Modellen anderer geothermischer Quellensysteme, wie z. B. Erdwärmekollektoren oder Grundwassersystemen, gekoppelt werden.

Wesentliche Anforderungen an ModHPS sind die Abbildung von thermischen Speichern, der Modi Heizung und TWE sowie die Implementierung von Regelungsalgorithmen, sowohl für monovalente als auch bivalente Systeme. Zur Einbindung von ModHPS in PlanGeoWP ergeben sich die folgenden zusätzlichen Anforderungen an die Modellierung:

- Modularer Aufbau mittels Klassenstrukturen
- Prozedurale Berechnung einer Vielzahl an Wärmepumpen zur Abbildung von Stadtquartierssystemen

- Kurze Rechenzeiten unter Anbetracht der prozeduralen Berechnung und der langen Betrachtungszeiträume in der Planung geothermischer Systeme
- Genauere Bestimmung der JAZ und weiterer Bewertungsparameter im Vergleich zu Berechnungswerkzeugen geologischer Fachplaner:
  - Nutzung von stundengenauen Gebäudelastkurven
  - Vereinfachte Modellierung von Puffer- und TWW-Speichern
  - Berechnung der temperaturabhängigen Leistungszahl in jedem Zeitschritt
  - Simulationsbasierte Berechnung der JAZ mittels verschiedener Bilanzen
- An die Kopplung mit dem Systemkonfigurator angepasste Funktionen und Simulationsergebnisse:
  - Implementierung von Regelungsansätzen für alle Wärmepumpenbetriebsweisen
  - Berücksichtigung von Sperrzeiten inklusive angepasster Regelung
  - Vereinfachte Abbildung der direkten geothermischen Kühlung über die Regelung
- Möglichkeit der bidirektionalen Kopplung von ModHPS an ein Untergrund-, Wärmequellen- oder Wärmenetzmodell als Grundlage zur Abbildung dynamischer Wechselwirkungen:
  - Implementierung von Funktionen zur Integration von ModHPS in MPFluidGeTIS
  - Implementierung einer Schnittstelle zwischen ModHPS und einem bestehenden analytischen Untergrundmodell
- Integration von ModHPS in die Werkzeugkette und Serverstruktur von PlanGeoWP durch die automatisierte Ansteuerung über den Systemkonfigurator

Unter Berücksichtigung der geringen Informationsdichte in frühen Planungsphasen und auf Quartiersebene sowie der langen Betrachtungszeiträume bei der Planung geothermischer Anlagen benötigt das Modell eine möglichst geringe Anzahl an Eingangsparametern und kurze Rechenzeiten. Um die oben genannten Funktionalitäten und Anforderungen zu integrieren und die Anzahl der Eingabeparameter zu reduzieren, sind einige Vereinfachungen notwendig. Die folgenden Annahmen und Vereinfachungen wurden deshalb getroffen:

- Interner Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe als Black-Box abgebildet
- Lineare Interpolation innerhalb von Herstellerleistungskennlinien
- Konstante Vorlauftemperaturen, jeweils für Heizung und TWW
- Konstanter Volumenstrom auf der Wärmequellenseite

- Keine Takt- oder Anfahrverluste berücksichtigt
- Speicher über Leistungsbilanzen abgebildet, ohne Berücksichtigung von Volumenströmen auf der Senkenseite
- Keine Energieverluste bei der Wärmeübertragung von der Wärmepumpe an die Speicher
- Ideal durchmischte Speicher
- Zeitlich linearer Speichertemperaturverlauf
- Konstante Bereitschaftswärmeverluste

3.4.2. Funktionsschema und Eingangsparameter

In Abbildung 3.5 sind das Funktionsschema des Modells und die Systemgrenze um den internen Wärmepumpenkreislauf dargestellt. Aufgrund des Black-Box-Ansatzes wird der interne Wärmepumpenkreislauf samt Wärmeübertragern, Drossel und Kompressor nicht modelliert, sondern vereinfacht über lineare, nach DIN EN 14511 genormte Herstellerleistungskurven (vgl. Abbildungen 2.5 und 2.6) approximiert. Somit werden die thermische Trägheit des Arbeitsmittelkreislaufs sowie Anfahr- und Taktverluste nicht abgebildet.

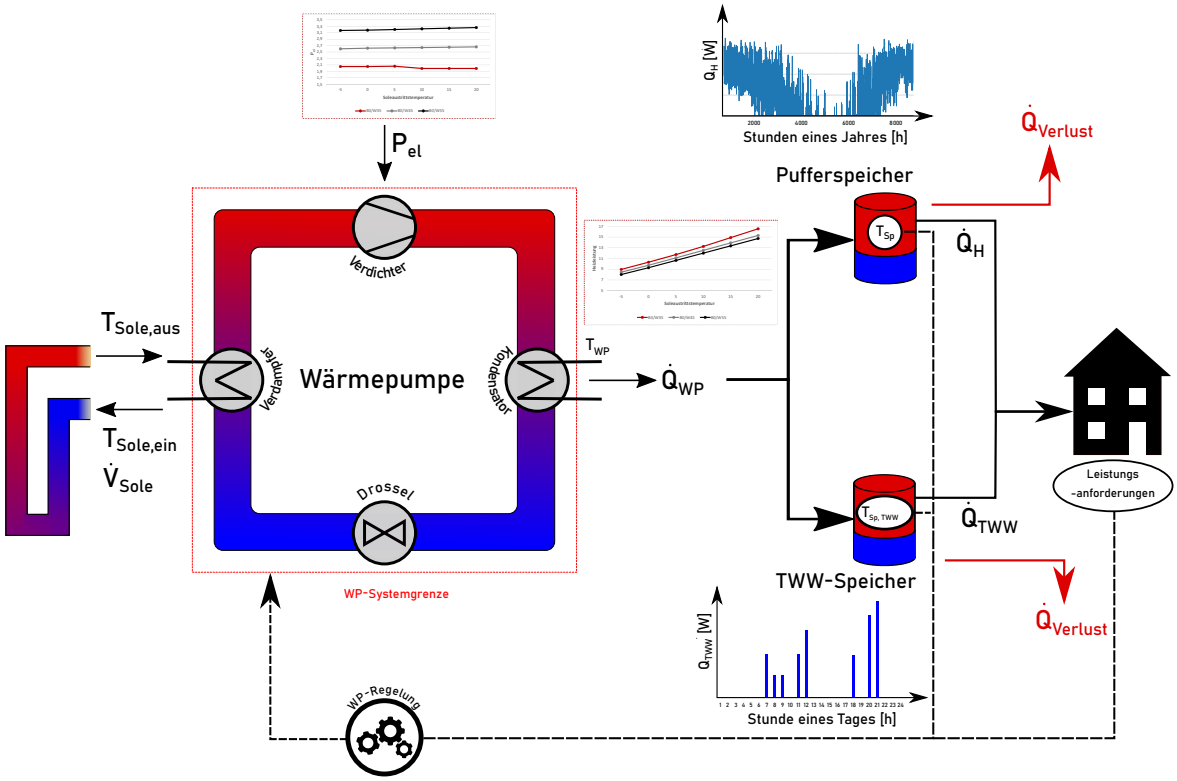


Abb. 3.5.: Funktionsschema des Wärmepumpensystemmodells

Anhand der Wärmequellenaustrittstemperatur ($T_{\mathrm{Sole,aus}}$) und in Abhängigkeit von der Temperaturstufe der Wärmepumpe (T_{WP}) kann deren Wärmeleistung ($\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$) und elektrische Leistungsaufnahme (P_{el}) für jeden Zeitschritt aus den Herstellerleistungskennlinien eines am Markt verfügbaren Wärmepumpengeräts linear interpoliert werden.

Die Wärmequellenaustrittstemperatur ist ein Übergabeparameter aus einem gekoppelten Untergrundmodell bzw. eine variable oder konstante Randbedingung für den Fall, dass ModHPS nicht an ein Untergrundmodell gekoppelt ist.

Die Temperaturstufe der Wärmepumpe wird, jeweils für die Modi Heizung und TWW, im Systemkonfigurator mittels der Eingaben zu den Nennvorlauftemperaturen und den herstellerbezogenen Temperaturstufen bestimmt und als konstant angenommen. Sie gibt das Kennlinienpaar der Wärmeleistung und elektrischen Leistungsaufnahme aus dem Kennlinienfeld vor, in denen linear interpoliert wird (siehe Abbildungen 2.5 und 2.6).

Die thermischen Speicher werden über vereinfachte Energiebilanzen abgebildet. Bilanzeingänge sind $\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$ sowie die Leistung eines zweiten Wärmeerzeugers im Falle von bivalenten Systemen. Bilanzausgänge sind konstante Speicherverluste und die stundengenauen Gebäudelasten für Heizung ($\dot{Q}_{\mathrm{H}}$) und TWW ($\dot{Q}_{\mathrm{TWW}}$). Eine detailliertere Beschreibung der Speichermodellierung erfolgt in Abschnitt 3.4.4.6.

Die stundengenauen Gebäudelasten sind Eingangsparameter des Modells und können durch die in PlanGeoWP integrierten Gebäudeberechnungswerkzeuge berechnet werden. Das Heizungsverteil- und das Heizwärmeübergabesystem samt deren Hydraulik sowie die Umwälzpumpen zwischen Wärmepumpe und thermischen Speichern werden nicht modelliert.

Die Speichertemperaturen und die aktuellen Gebäudelasten sind neben anderen Parametern Eingangswerte für die implementierten Regelungsalgorithmen (vgl. Abschnitt 3.4.4). Die Regelungsalgorithmen bestimmen den Status der Wärmepumpe. Er gibt an, ob die Wärmepumpe an- oder ausgeschaltet ist.

Anhand des Status, des Volumenstroms der Wärmequellenanlage ($\dot{V}_{\mathrm{Sole}}$) sowie der Dichte und spezifischen Wärmekapazität der Sole wird die Wärmequelleneintrittstemperatur ($T_{\mathrm{Sole,ein}}$), die an ein bidirektional gekoppeltes Untergrundmodell übergeben wird, über eine Bilanz um den Verdampfer berechnet (siehe Gleichung 3.1 aus Abschnitt 3.4.4.4).

Alle notwendigen Daten bezieht ModHPS aus der Input-XML-Datei, die beispielsweise durch das Web-Geoportal erzeugt wird. In Tabelle C.1 sind die notwendigen Eingangsparameter von ModHPS sowie die Werkzeuge bzw. Datenquellen aufgelistet, aus denen die Informationen aggregiert und in die XML-Datei gespeichert werden. Zusätzlich sind in Tabelle C.2 die notwendigen Parameter aus Tabelle C.1 mit ergänzenden Beschreibungen enthalten sowie in Tabelle C.3 weitere Parameter aufgeführt und beschrieben, die u. a. bei der Kopplung zu verschiedenen Untergrundmodellen, bei unterschiedlichen Betriebsweisen, bei Kühlanwendungen oder Sperrzeiten benötigt werden.

3.4.3. Modell- und Implementierungsstruktur

Die Implementierungsstruktur von ModHPS ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

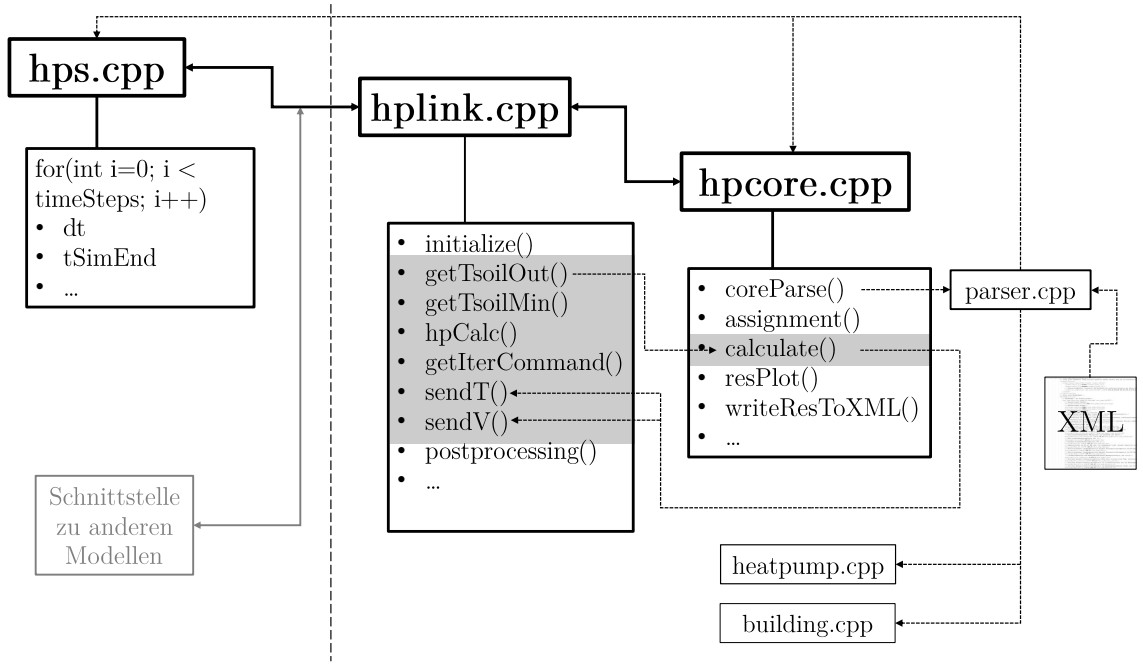


Abb. 3.6.: Implementierungsstruktur von ModHPS (Berechnungskern grau hinterlegt)

In Abhängigkeit von der Art des gekoppelten Untergrundmodells und der Hierarchie der beteiligten Modelle werden die Funktionen von ModHPS von unterschiedlichen Stellen aufgerufen. Ist ModHPS das bestimmende Modell (*Master*), werden die Funktionen aus den Dateien *hplink.cpp* und *hpcore.cpp* über Funktionen der Klasse *hps.cpp* aufgerufen. Ist ModHPS das untergeordnete Modell (*Slave*), werden die Funktionen aus *hplink.cpp* und *hpcore.cpp* über eine Schnittstelle vom gekoppelten Untergrundmodell aufgerufen.

Der generelle Programmablauf umfasst drei Phasen: Das Preprocessing, die Hauptberechnung und das Postprocessing. Im Preprocessing werden über die Funktionen *initialize()* und *coreParse()* sowie über weitere Funktionen in der Datei *parser.cpp* alle für das Modell notwendigen Variablen und Parameter aus der XML-Datei eingelesen oder initialisiert. Für den Modellaufruf relevante Variablen, wie z. B. die Zeitschrittweite und der Berechnungszeitraum, werden nach dem Parsen an *hps.cpp* übertragen.

Die modulare Implementierungsstruktur erlaubt eine Unterscheidung von Wärmepumpeninstanzen (*HeatPump* in der Datei *heatpump.cpp*) und Gebäudeinstanzen (*Building* in der Datei *building.cpp*). Jede Wärmepumpeninstanz repräsentiert eine Wärmepumpe bzw. mehrere Wärmepumpengeräte im Falle einer Kaskade.

Mithilfe der Funktion *assignment()* werden die angeschlossenen Erdwärmesonden und Gebäude den Wärmepumpeninstanzen zugeordnet. ModHPS kann mit jeder Konstellation von

Wärmepumpen, Gebäuden und Erdwärmesonden umgehen (siehe Abbildung 3.7). Zusätzlich werden durch *assignment()* Modellparameter und Variablen anhand der Zuordnung bestimmt. Beispielsweise wird der Nennvolumenstrom der Wärmepumpe auf die Anzahl der angeschlossenen Erdwärmesonden gleichmäßig aufgeteilt. Nach der Zuordnung von Gebäuden und Wärmepumpen werden die stündlichen Jahreslastkurven für Heizung und TWW der einzelnen Wärmepumpeninstanzen aufsummiert bzw. auf die Wärmepumpen aufgeteilt. Ist der Simulationszeitraum größer als ein Jahr, werden die entsprechenden Lastkurven für die folgenden Jahre wiederverwendet.

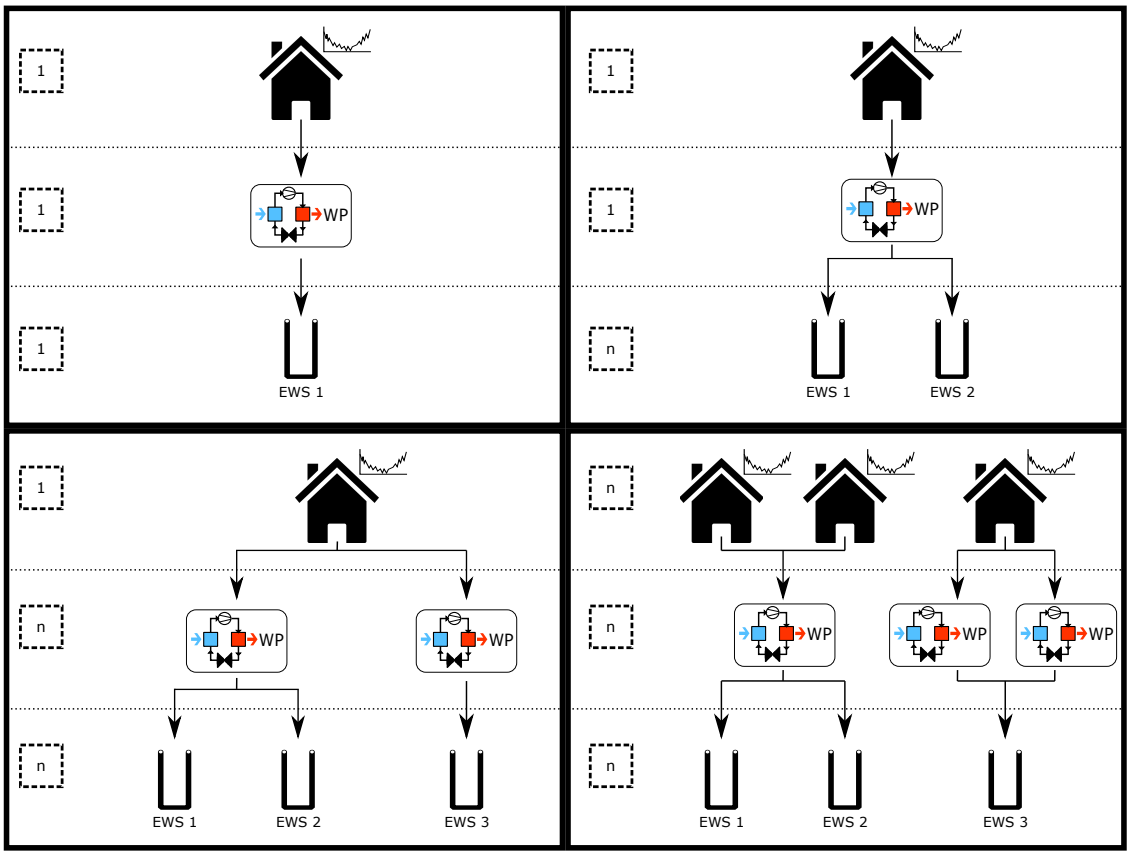


Abb. 3.7.: Zuordnungsmöglichkeiten der Wärmepumpen zu Gebäuden und Erdwärmesonden

Die jeweilige Regelung jeder Wärmepumpeninstanz wird auf der Grundlage des Einsatzbereichs, der thermischen Speicher und des Verdichterbetriebs definiert. In Abbildung 3.8 sind alle Kombinationsmöglichkeiten sowie zwei beispielhafte Kombinationspfade dargestellt. Der Einsatzbereich und die Speichervolumina legen die möglichen Speicherkombinationen fest. ModHPS verwendet die Anwendungsfelder: Heizung, Warmwasser, Kühlung sowie die möglichen Kombinationen untereinander. Ist die Wärmepumpe z. B. nur für Heizungszwecke ausgelegt, werden dementsprechend keine TWW-Speicher angesetzt. In diesem Fall wird der Wärmepumpeninstanz in Abhängigkeit des Speichervolumens ein oder kein Pufferspeicher zugeordnet. Sind weder Puffer- noch TWW-Speicher angeschlossen regelt das Wärmepumpenmodell anhand der stündlichen Gebäudelastprofile für Heizung und TWW. ModHPS bildet taktende Wärmepumpen und damit eine An-Aus-Regelung des Verdichters ab. Durch

die modulare Code-Struktur können zukünftig Regelungsalgorithmen für leistungsgeregelte Verdichter ergänzt werden.

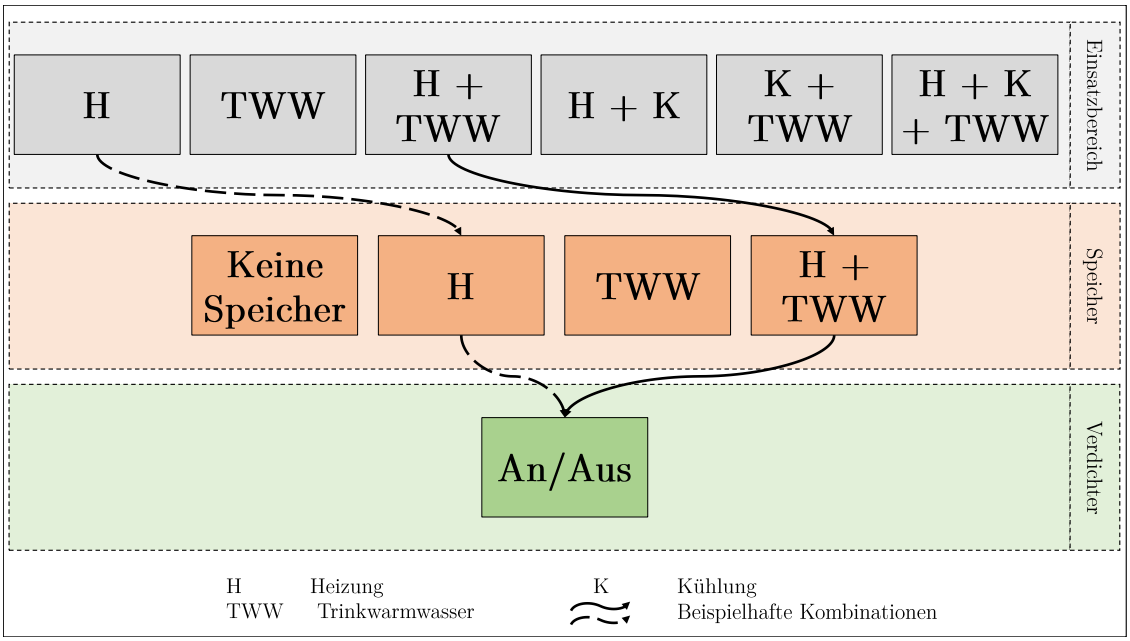


Abb. 3.8.: Zuordnung der Wärmepumpenregelung bezüglich Einsatzbereich, Speicher und Verdichterbetrieb (in Anlehnung an van Treeck et al. [2020])

Nach dem Preprocessing beginnt der eigentliche Rechenprozess des Modells. In jedem Zeitschritt werden alle Wärmepumpenobjekte prozedural berechnet. Dazu werden die Funktionen *getTsoilOut()*, *hpCalc()*, *calculate()*, *sendT()* und *sendV()* aufgerufen (siehe Abbildung 3.6). Über *getTsoilOut()* wird die aktuelle Wärmequellenaustrittstemperatur aus dem gekoppelten Untergrundmodell bezogen. Mithilfe der Wärmequellenaustrittstemperatur werden innerhalb von *calculate()* die Wärmequelleneintrittstemperatur berechnet und der Volumenstrom auf der Wärmequellenseite anhand des Wärmepumpenstatus festgelegt. Letztere werden anschließend über *sendT()* und *sendV()* in Form von Vektoren an das gekoppelte Untergrundmodell gesendet. Die Funktion *calculate()* wird in Abschnitt 3.4.4 detailliert beschrieben.

Bei der Kopplung an MPFluidGeTIS werden zusätzlich *getTsoilMin()* für den Bezug der minimalen Bodenzellentemperatur sowie *getIterCommand()* aufgerufen. Der Untergrund wird in MPFluidGeTIS in 3D abgebildet. Es entsteht ein Rechengitter mit einzelnen Bodenzellen, in denen in jedem Untergrundzeitschritt Zustandsgrößen wie z. B. die Temperatur berechnet werden. Liegt die global im Rechengitter ermittelte minimale Bodenzelltemperatur unterhalb eines definierten Wertes (kritische Bodenzelltemperatur) wird die Wärmepumpe abgeschaltet. Die kritische Bodenzelltemperatur kann beispielsweise zur Kontrolle von Bodenfrost genutzt werden (siehe [van Treeck et al., 2020]). *getIterCommand()* liefert die Information über die Gültigkeit der letzten Iteration des Untergrundmodells und beeinflusst damit die Speicherung der Variablen von ModHPS in die Ergebnisvektoren. Auf die Besonderheiten

der Kopplung mit MPFluidGeTIS und anderen Untergrundmodellen wird in Abschnitt 3.4.6 näher eingegangen.

Im Anschluss an den letzten Durchlauf des Berechnungskerns startet das Postprocessing. Innerhalb dieser Phase werden die Funktionen *postprocessing()*, *makeTXTend()*, *resPlot()* und *writeResToXML()* aufgerufen und die Ergebnisse in Text- (.txt) und in PDF-Form ausgegeben sowie in die XML-Struktur abgespeichert. Die von ModHPS erstellten Ergebnisdaten und -dateien werden in Abschnitt 3.4.5 näher erläutert.

3.4.4. Beschreibung des Berechnungskerns und der Regelungsalgorithmen

Im Folgenden wird auf die Logik des Berechnungskerns und die implementierten Regelungsalgorithmen näher eingegangen.

Zu Beginn der *calculate()*-Funktion werden dem aktuellen Zeitschritt die Gebäudelasten für Heizung und TWW zugeordnet sowie die Wärmequellenaustrittstemperatur ermittelt. Für mehrere an die Wärmepumpe angeschlossene Erdwärmesonden wird der von der Wärmepumpe festgelegte Volumenstrom der Wärmequellenseite gleichmäßig auf die einzelnen Erdwärmesonden aufgeteilt. Die Wärmequellenaustrittstemperatur, die zur Berechnung der Nutzwärmeabgabe der Wärmepumpe verwendet wird, ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der Austrittstemperaturen der Einzelsonden. Die Sondenaustrittstemperaturen werden von einem gekoppelten Untergrundmodell an ModHPS übergeben. Anschließend werden weitere Funktionen aufgerufen. In Abbildung 3.9 ist die Sequenz der aufgerufenen Funktionen abgebildet.

3.4.4.1. Betriebsmodus

Die Funktion *modeControl()* bestimmt den Betriebsmodus der Wärmepumpe. ModHPS unterscheidet zwischen den Modi Heizung und TWW mit entsprechenden Temperatur- und Leistungsniveaus. Die Wärmepumpe bedient in jedem Zeitschritt nur einen der beiden Modi. TWW wird i. d. R. bei höheren Temperaturen bereitgestellt als Heizwärme für Flächenheizungen, sodass die Wärmepumpenheizleistung und die Leistungszahl geringer sind. Die Heizungsvorlauftemperatur ist in der Praxis abhängig von der eingestellten Heizkurve und der Außentemperatur. Die Heizkurven werden i. d. R. von den Heizungsmonteuren eingestellt und können von den Nutzern im laufenden Betrieb geändert werden. Dadurch ist die Heizkurve nicht festgelegt und somit die außentemperaturabhängige Heizungsvorlauftemperatur in der Planungsphase schwer abzuschätzen. Innerhalb von ModHPS werden Vorlauftemperaturen und somit auch die Wärmepumpenstufen für den jeweiligen Betriebsmodus als konstant und unabhängig von der Außentemperatur angenommen.

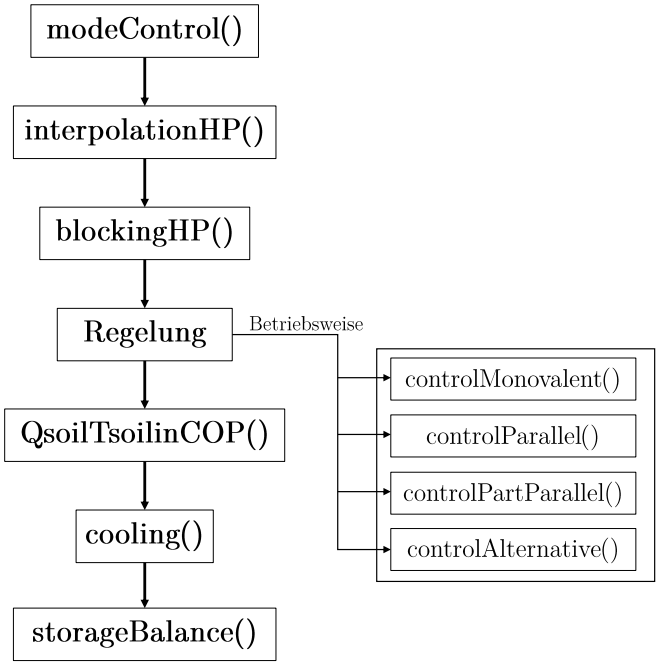


Abb. 3.9.: Struktur des Berechnungskerns (*calculate*-Funktion)

Die Eingangsdaten und berechneten Variablen von *modeControl()* sind im Anhang in Abbildung C.1 aufgelistet. In Abhängigkeit des Einsatzbereichs und der angeschlossenen thermischen Speicher nutzt *modeControl()* unterschiedliche Regelungsmechanismen (siehe Abbildung 3.10).

Bei ausschließlichem Heizbetrieb oder TWE bzw. bei der Kombination von Heizen oder TWW mit Kühlung ist der Betriebsmodus festgelegt. In ModHPS ist momentan die direkte geothermische Kühlung als vereinfachter Algorithmus ohne eigenen Betriebsmodus implementiert. Der Algorithmus wird weiter unten mit der Funktion *cooling()* erläutert.

Bei der Nutzung der Wärmepumpe sowohl zum Heizen als auch zur TWE wird anhand der Temperaturen der angeschlossenen Speicher (T_{st} bzw. $T_{st,DHW}$)[3] geregelt. Sind keine thermischen Speicher oder nur ein Pufferspeicher an die Wärmepumpe angeschlossen, bestimmen einzig die Gebäudelasten für Heizung bzw. TWW den Betriebsmodus. Ist ausschließlich ein TWW-Speicher installiert, werden die TWW-Speichertemperatur und die aktuell anliegende Gebäudelast für Heizung überprüft.

Da in der Praxis häufig eine Vorrangschaltung für die TWE eingesetzt wird [Koenigsdorff, 2011] und sie auch nach DIN EN 15450 [2007] empfohlen wird, fragt *modeControl()* zuerst die TWW-Speichertemperaturen bzw. Leistungsanforderungen für TWW ab. Anschließend werden die entsprechenden Parameter für die Beheizung überprüft. Bezüglich der Beheizung

[3]In dieser Abbildung und in den folgenden Abbildungen sind die Variablen wie im Programmiercode benannt. Deswegen können bei der Verwendung von Abkürzungen Doppelungen (jeweils deutsch und englisch) auftreten.

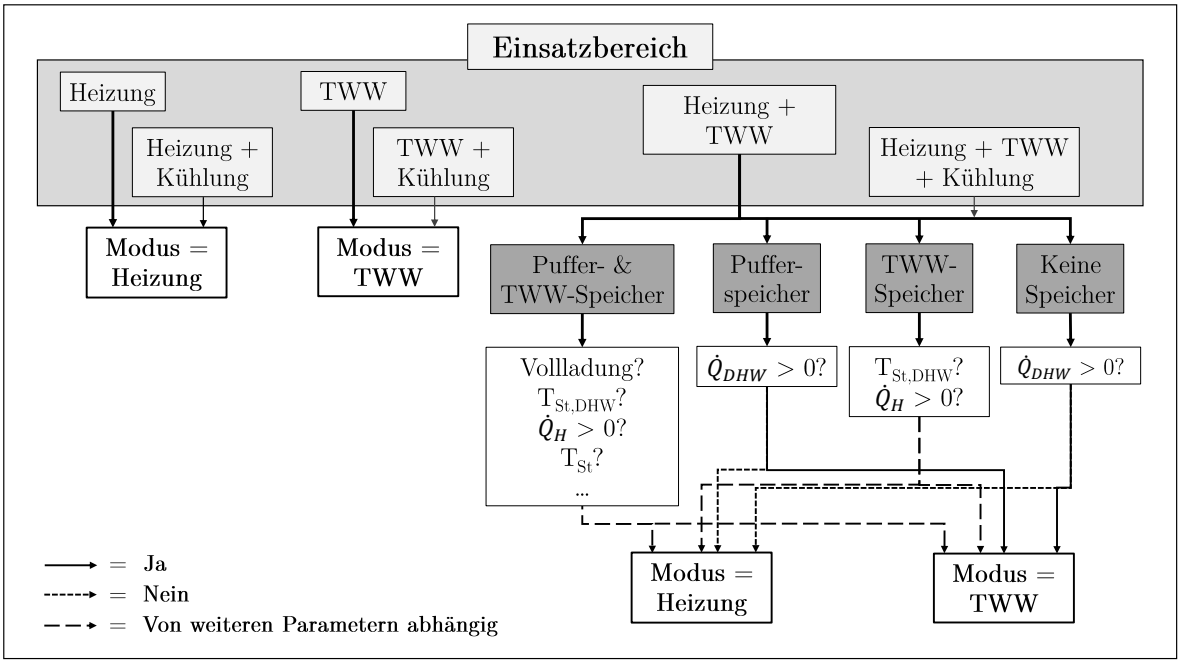


Abb. 3.10.: Struktur der Funktion *modeControl*

ist eine Sommerabschaltung implementiert, die den Betriebsmodus auf TWW setzt, falls im aktuellen Zeitschritt kein Heizleistungsbedarf vorliegt.

Beim Bezug von vergünstigten Wärmepumpenstromtarifen kann der Stromversorger die Wärmepumpe zu bestimmten Zeiten sperren (vgl. Abschnitt 2.5.2). Zur Sicherstellung der Lastdeckung in den Sperrzeiten müssen die Speicher ausreichend groß dimensioniert und geladen sein. In Abbildung 3.11 ist die Überprüfung der Vollladung und Sperrung grafisch dargestellt.

Die Eingangsdaten, berechneten Variablen und die Logikstrukturen der Vollladung und Sperrung sind in Anhang C.3 aufgeführt. Die Funktion *HPControlLoadStorageFull()* überprüft, ob in der folgenden Stunde des aktuellen Zeitschritts eine Sperrung vorliegt (vgl. Abbildung C.5). Ist das der Fall, wird die Speichervollladefunktion (*LoadStorageFull()*) aufgerufen. *LoadStorageFull()* setzt den Status der Wärmepumpe anhand des Betriebsmodus, der angeschlossenen Speichertypen, der Speichertemperaturen und Gebäudelasten auf *an* oder *aus* (siehe Abbildung C.6). Mit Beginn der Vollladung wird die Wärmepumpe angeschaltet. Sie bleibt so lange in Betrieb, bis die Sperrzeit beginnt oder beide Speicher voll geladen sind. In Abbildung C.3 ist die Logikstruktur der Modusregelung bei Puffer- und TWW-Speichern dargestellt. Sind sowohl ein Puffer- als auch TWW-Speicher an die Wärmepumpe angeschlossen, wird die Information zu einer aktiven Vollladung über die Variable *fullLoad* für eine geänderte Bestimmung des Betriebsmodus abgefragt.

Um die Sommerabschaltung auch bei der Speichervollladung zu berücksichtigen, wird anhand der erstellten Gebäudelastkurven mit einer Vorhersage überprüft, ob im nächsten Stundenschritt eine Heizleistungsanforderung der angeschlossenen Gebäude vorliegt. Liegt keine

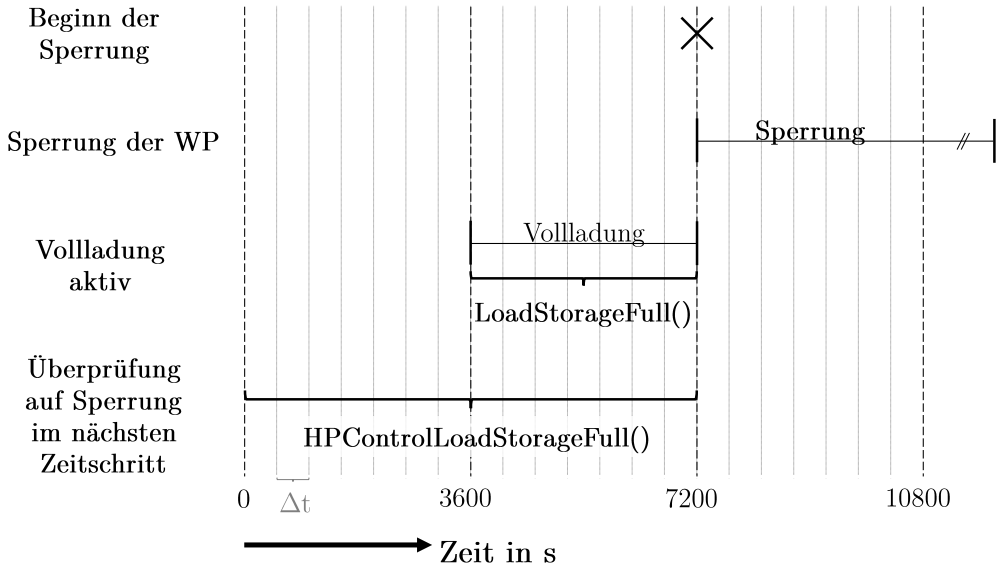


Abb. 3.11.: Überprüfung der Sperrzeiten und Einsatzzeitpunkte der beteiligten Funktionen

Heizleistungsanforderung vor und ist die Wärmepumpe im nächsten Stundenschritt gesperrt, muss der Pufferspeicher vor der Sperrung nicht aufgeladen werden und der Betriebsmodus wird zu TWW gesetzt. Die Zeitschaltung, die den Beginn des Aufladens vor einer Sperrzeit regelt, ist aufgrund dieser Lastvorhersage auf eine Stunde begrenzt. Eine weiterentwickelte Abfrage bezüglich der Vollladung kann ergänzt werden.

Liegt keine Sommerabschaltung in den betrachteten Stundenschritten vor, wird im Folgenden die TWW-Speichertemperatur im Sinne der Vorrangschaltung überprüft. Für die Speichervollladung wird durch eine Hysterese ein Bereich unterhalb der maximalen TWW-Speichertemperatur definiert. Beide Parameter werden aus der XML-Datei bezogen und sind konstant. Liegt die Speichertemperatur unterhalb des Bereichs, wird die Wärmepumpe in den TWW-Modus gesetzt. Andernfalls werden weitere Abfragen bezüglich der aktuellen und in der nächsten Stunde auftretenden Heizleistungsanforderungen sowie der Pufferspeichertemperatur für die Bestimmung des Betriebsmodus genutzt.

Ist die Vollladung nicht aktiv, wird anhand der Vorrangschaltung zuerst die TWW-Speichertemperatur, dann der Heizleistungsbedarf und anschließend die Pufferspeichertemperatur überprüft. In der Sperrzeit ist die Wärmepumpe durchgehend ausgeschaltet. Die Funktion *blockingHP()* legt die Sperrung anhand der Sperrzeitendauer und der Verteilung über den Tag fest (siehe Abbildung C.8). Die dafür benötigten Informationen werden innerhalb des Preprocessings aus der XML-Datei geparst.

Für die Speichervollladung, sonstige Regelungsfunktionen und die Speicherbilanzen sind einheitliche Ober- und Untergrenzen der Speichertemperatur implementiert. In Abbildung 3.12 sind exemplarische Temperaturverläufe mit den Temperaturgrenzen für die Speicherbilanzen und Wärmepumpenregelung dargestellt. Die Untergrenze entspricht der minimalen Speicher-

temperatur ($T_{\min}$) plus der Hysterese, die Obergrenze der Wärmepumpentemperaturstufe (T_{WP}).

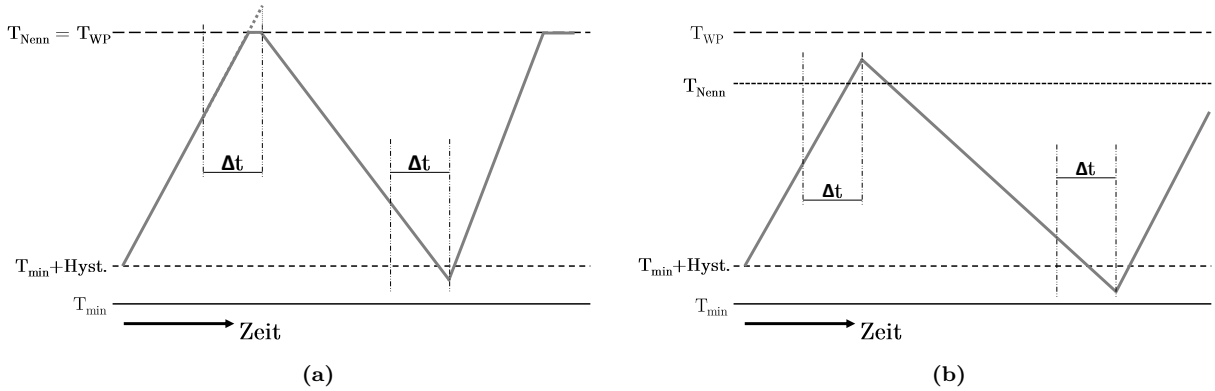


Abb. 3.12.: Grenzrandbedingungen für Speicher: (a) Nennvorlauftemperatur (T_{Nenn}) entspricht der Wärmepumpentemperaturstufe (T_{WP}); (b) Wärmepumpentemperaturstufe ist größer als die Nennvorlauftemperatur

Unterscheidet sich die Nennvorlauftemperatur (T_{Nenn}) von der Temperaturstufe der Wärmepumpe, kann die Nennvorlauftemperatur überschritten werden (siehe Abbildung 3.12b). Ist die aktuelle Speichertemperatur größer bzw. gleich der Nennvorlauftemperatur, wechselt die Wärmepumpe den Betriebsmodus. Aufgrund einer vereinfachten Speicherbilanz mit resultierendem zeitlich linearen Temperaturverlauf kann es vorkommen, dass die Temperaturstufe der Wärmepumpe innerhalb eines Zeitschritts überschritten wird (siehe Abbildung 3.12a). In diesem Fall wird zur Einhaltung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten die berechnete Speichertemperatur der Temperaturstufe der Wärmepumpe gleichgesetzt (durchgezogener Kurvenverlauf). Zur Einhaltung der Energieerhaltung werden nur die Leistungen der Wärmeerzeuger und die daraus resultierenden Energien berücksichtigt, die für die Erhöhung auf die Grenztemperatur notwendig sind. Die Berechnung der aktuellen Speichertemperatur wird hierarchisch am Ende durch die Funktion *storageBalance()* aufgerufen (siehe Abbildung 3.9) und wird weiter unten erläutert.

Durch die oben beschriebenen Grenzen und die Hysterese ergeben sich nutzbare Temperaturbereiche für Puffer- und TWW-Speicher. Die Hysterese wird auf die minimalen Speichertemperaturen addiert bzw. bei einer Vollladung von den maximalen Speichertemperaturen abgezogen, um das Einschalten der Wärmepumpe zu beeinflussen.

3.4.4.2. Interpolation und Kaskaden

Die Funktion *interpolationHP()* berechnet die Heizleistung und elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe für jeden Zeitschritt durch lineare Interpolation zwischen den Messpunkten der zugehörigen Herstellerkennlinien. Die Eingangsdaten und berechneten Variablen von *interpolationHP()* sind in Abbildung C.10 aufgelistet. Die verwendeten Herstellerkennfelder sind nach DIN EN 14511 für verschiedene Systemtemperaturen und Prüfzyklen genormt.

Der Aufbau der Kennfelder und die Randbedingungen der Normmessung sind in Kapitel 2.2 genauer beschrieben.

Anhand des Betriebsmodus und der zugeordneten Temperaturstufe der Wärmepumpe kann das Kennlinienpaar identifiziert werden, das für die Interpolation der Wärmeleistung (vgl. Abbildung 2.5) und elektrischen Leistungsaufnahme (vgl. Abbildung 2.6) der Wärmepumpe herangezogen wird. Die berechneten Leistungen und somit auch die Leistungszahl im jeweiligen Betriebspunkt der Wärmepumpe sind neben der Temperaturstufe maßgeblich von der Wärmequellenaustrittstemperatur abhängig [4].

Die Prüfpunkte der Wärmequellenaustrittstemperaturen der verwendeten Herstellerkurven reichen von −5 °C bis 20 °C. Falls die Wärmequellenaustrittstemperatur außerhalb dieser Bandbreite liegt, wird die Wärmepumpe abgeschaltet. Für einen effizienten Systembetrieb und aufgrund von Frostgefahr im Untergrund ist es sinnvoll, −5 °C nicht zu unterschreiten. Die maximale Wärmequellenaustrittstemperatur, die in der Heizperiode auftreten kann, entspricht der ungestörten Erdreichtemperatur. In Deutschland liegt diese Temperatur um 10 °C bis 12 °C. Wesentlich höhere Erdreichtemperaturen treten i. d. R. nur durch Wärmeübertragungen in den Untergrund aus dem Kühlbetrieb oder aufgrund anderer Wärmequellen auf. Der Wärmeeintrag wird durch Konduktion und Konvektion bei vorhandenem Grundwasserstrom im Untergrund verteilt. Der Temperaturanstieg des Bodens ist durch die Temperatur der Wärmeeintragsquelle begrenzt und durch die Trägheit des Erdreichs zeitlich versetzt zu dem Energieeintrag.

Mit einer korrekten Dimensionierung, Installation und einem Betrieb der Anlage, der dem Stand der Technik entspricht, kann eine Über- oder Unterschreitung der Temperaturgrenzen vorgebeugt werden. Sollten im realen Betrieb die Grenzen erreicht werden, gibt die Reglereinheit der Wärmepumpe Überdruck- bzw. Unterdruckstörungen aus, sodass die Wärmepumpe automatisch abschaltet. Somit ist eine Extrapolation außerhalb der Prüfpunkte nicht notwendig. Im Gegensatz zu anderen Wärmepumpenmodellen, die ebenfalls lineare Ansätze verwenden (u. a. [Hein et al., 2016a; Marti et al., 2009] siehe Abschnitt 2.8.3 und [Weck-Ponten et al., 2022]), wird in ModHPS neben dem Verzicht auf Extrapolation keine Interpolation zwischen Leistungskurven verschiedener Temperaturniveaus verwendet. ModHPS ist innerhalb des Bereichs der zugeordneten Leistungskurve am Markt verfügbarer Wärmepumpen gültig. Somit wird nur das am Prüfstand getestete Verhalten realer Wärmepumpen abgebildet.

In der Input-XML-Datei wird für jede simulierte Wärmepumpe genau ein Herstellerleistungskennfeld abgespeichert. Im Falle einer Wärmepumpenkaskade werden die Herstellerleistungskennlinien der beteiligten Wärmepumpengeräte addiert und zur Berechnung der gesamten Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme der Kaskade genutzt (siehe Abbildung 3.13). Ein Kaskadenvektor bildet die prozentualen Anteile der Nennheizwärmeleistungen der beteiligten Wärmepumpen (bei 0 °C Systemvorlauftemperatur) an der Gesamtleistung

[4] Die berechnete, von der Wärmequellenaustrittstemperatur und der Temperaturstufe der Sekundärseite abhängige Wärmepumpenleistung wird der Einfachheit halber im Folgenden als die berechnete Wärmepumpenheizleistung bezeichnet.

ab. Die Reihenfolge der Vektoreinträge entspricht dabei der Einsatzreihenfolge der einzelnen Wärmepumpen. Die erste Wärmepumpe ist dabei die Grundlastwärmepumpe. Am Ende der Interpolationsfunktion wird anhand des Kaskadenvektors sowie der aktuellen Wärmequellenaustrittstemperatur und Systemvorlauftemperatur abgefragt, welche Wärmepumpen innerhalb der Kaskade in Betrieb sind. Im Beispiel von Abbildung 3.13 beträgt die aktuelle Gebäudeheizlast 10 kW und die Wärmequellenaustrittstemperatur 10 °C. Die durch den ersten Eintrag des Kaskadenvektors (hier 0,36) erzeugte Wärmeleistung reicht nicht aus, um die Gebäudeheizlast zu decken, sodass zusätzlich zur Grundlastwärmepumpe die zweite Wärmepumpe zugeschaltet werden muss. Folglich sind alle an der Kaskade beteiligten Wärmepumpen in Betrieb und die Summe der Wärmeleistungen wird angesetzt.

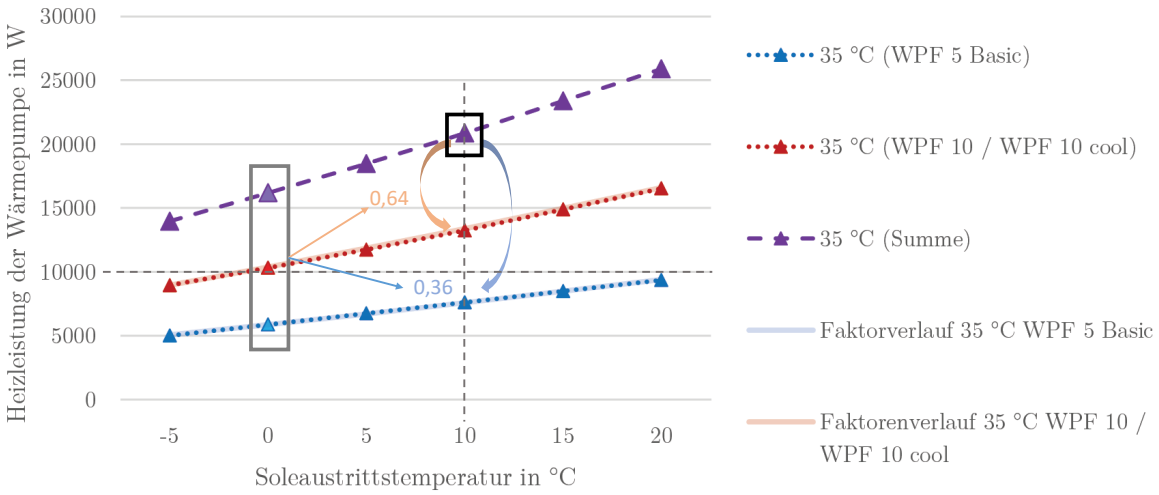


Abb. 3.13.: Exemplarische Kennlinien der Heizleistungen einer Kaskade aus den Wärmepumpen der Typen *WPF 5 basic* und *WPF 10 / WPF 10 cool* für Systemvorlauftemperaturen von 35 °C und 55 °C sowie die durch den Kaskadenvektor erzeugten Lastkurven (Faktorenverläufe in Hellblau bzw. Hellrot)

Um lange Speicherladezeiten, insbesondere vor Sperrzeiten, zu vermeiden, wird die Leistungsaufteilung erst genutzt, wenn der entsprechende Speicher mindestens zur Hälfte geladen ist. Andernfalls wird die gesamte Heizleistung der Wärmepumpenkaskade angesetzt. Neben der Wärmeleistung werden auch die summierte elektrische Leistungsaufnahme und der summierte Volumenstrom der Wärmequellenanlage auf die an der Kaskade beteiligten Wärmepumpen aufgeteilt.

3.4.4.3. Betriebsweisenspezifische Regelungen

Im Anschluss an die Bestimmung der Wärmepumpenleistungen sowie die Berücksichtigung von Kaskaden und Sperrzeiten wird der Wärmepumpenstatus über die betriebsweisenspezifi-

schen Regelungen ermittelt. In ModHPS sind Regelungsalgorithmen für alle Wärmepumpenbetriebsweisen implementiert. Die Regelungsfunktionen werden in Funktionen für monovalente, parallele, teilparallele und alternative Betriebsweisen unterteilt. Im Gegensatz zu Reglern, die in realen Wärmepumpenheizungsanlagen installiert sind, wird aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit in frühen Planungsphasen und auf Quartiersebene nicht nach den Rücklauftemperaturen des Heizungsverteilsystems geregelt, sondern nach den Speichertemperaturen und den Gebäudelasten. Die Eingangsdaten und berechneten Variablen der Regelungsalgorithmen sind in Abschnitt C.5 aufgeführt. Die Regelungskonzepte werden im Folgenden erläutert.

Die monovalente Betriebsweise wird über die Funktion *controlMonovalent()* geregelt. Die monovalente Regelungsstruktur ist neben der Betriebsweise u. a. von den Einsatzgrenzen der Interpolation, von den Sperrzeiten und von Randbedingungen eines gekoppelten Untergrundmodells abhängig (siehe Abbildung C.1). Eine Randbedingung des numerischen Untergrundmodells MPFLuidGeTIS ist die kritische Bodenzelltemperatur (siehe Abschnitt 3.4.3). Liegt die vom Untergrundmodell übertragene Bodentemperatur unterhalb eines im Geoportal eingegebenen Grenzwertes, schaltet die monovalente Regelungsfunktion die Wärmepumpe aus. Gleiches geschieht, wenn die Wärmequellenaustrittstemperatur außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Interpolation liegt (siehe Abbildung 3.14). Sind die Bodenzelltemperaturen höher als der kritische Wert und liegt die Wärmequellenaustrittstemperatur innerhalb des Anwendungsbereichs der Herstellerangaben, wird die Sperrzeit geprüft. Liegen keine Sperrzeiten vor, wird in *controlMonovalent()* die Funktion *HPonControl()* aufgerufen. Wenn für die Wärmepumpe Sperrzeiten gelten und sie gerade nicht gesperrt ist, schaltet *controlMonovalent()* auf die Funktion *HPControlLoadStorageFull()* um (siehe Abbildung C.5). Bei einer Sperrung wird die Wärmepumpe ausgeschaltet.

HPonControl() ist die Basisregelfunktion, die von allen betriebsweisenspezifischen Regelungen aufgerufen wird. Die Logik von *HPonControl()* ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Anhand des Betriebsmodus (*0 = Heizen; 1 = TWW*), der angeschlossenen thermischen Speicher (*0 = Puffer- und TWW-Speicher; 1 = nur Pufferspeicher; 2 = nur TWW-Speicher; 3 = keine Speicher*), der aktuellen Gebäudebedarfe (Heizlast ($\dot{Q}_{\mathrm{H}}$) bzw. TWW-Last ($\dot{Q}_{\mathrm{DHW}}$)), der Speichertemperaturen (T_{St}, $T_{\mathrm{St,min}}$, $T_{\mathrm{St,max}}$, $T_{\mathrm{St,DHW}}$, $T_{\mathrm{St,DHW,min}}$, $T_{\mathrm{St,DHW,max}}$) sowie der Hysterese wird der Status der Wärmepumpe ermittelt.

Befindet sich die Wärmepumpe im Heizbetrieb und ist ein Pufferspeicher installiert, wird überprüft, ob ein Heizleistungsbedarf vorliegt. Bei vorliegendem Heizleistungsbedarf wird die Wärmepumpe angeschaltet, sobald die Pufferspeichertemperatur unterhalb der Speichertemperaturuntergrenze liegt. Falls kein Pufferspeicher installiert ist, wird die Wärmepumpe angeschaltet, sobald ein Heizleistungsbedarf vorliegt. Liegt kein Heizleistungsbedarf im aktuellen Zeitschritt vor, wird die Wärmepumpe abgeschaltet.

Befindet sich die Wärmepumpe im TWW-Betrieb, wird der Status anhand der Speicherabfrage und der TWW-Speichertemperatur oder dem Leistungsbedarf für TWW im aktuellen Zeitschritt bestimmt. Liegt die TWW-Speichertemperatur zwischen der unteren und

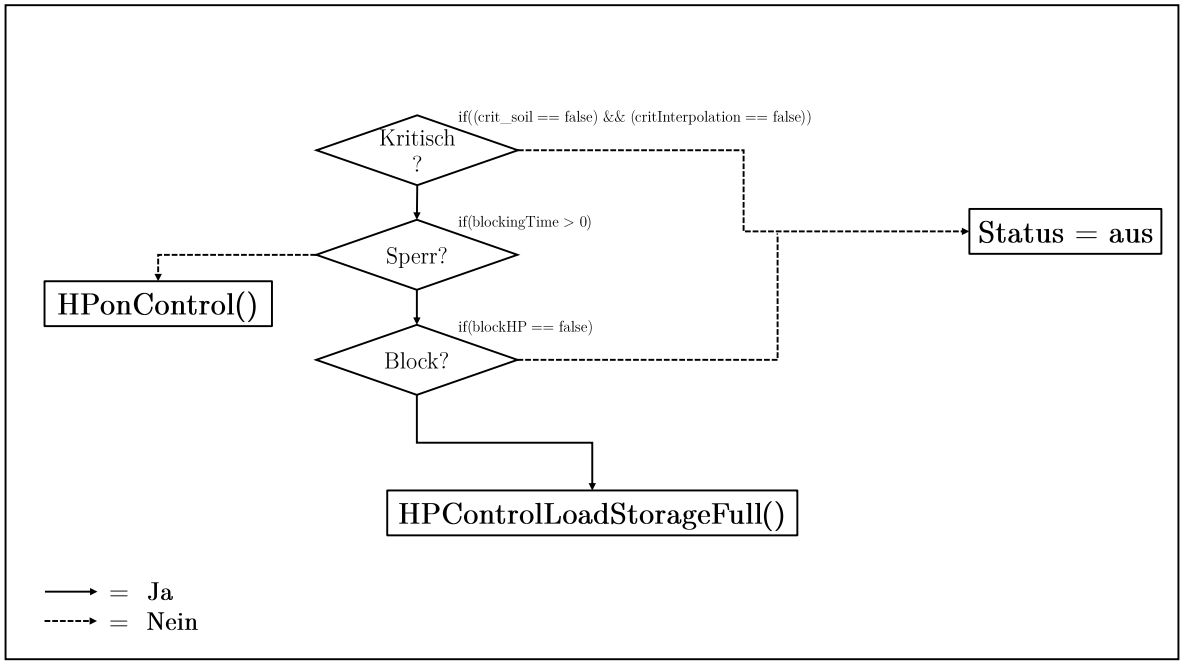


Abb. 3.14.: Regelungsansatz für die monovalente Betriebsweise

oberen Grenze, wird zusätzlich die Pufferspeichertemperatur abgefragt, falls ein Pufferspeicher an die Wärmepumpe angeschlossen ist. Ist der Pufferspeicher voll geladen und somit die Pufferspeichertemperatur größer oder gleich der Speichertemperaturobergrenze, bleibt die Wärmepumpe zum Nachladen des TWW-Speichers angeschaltet, sodass die TWW-Speichertemperatur auf einem hohen Niveau gehalten wird.

Neben dem monovalenten Betrieb können Wärmepumpen auch bivalent betrieben werden. Bivalent betriebene Wärmepumpensysteme mit fossilem Spitzenlasterzeuger werden in der Praxis selten eingesetzt [Born et al., 2017]. Insbesondere in Ein- und Zweifamilienhäusern ist deren Einsatz i. d. R. nicht wirtschaftlich [ELTRON, 2019]. Im Sinne der Dekarbonisierung des Energiesystems ist zukünftig auf die Installation von fossilen Erzeugern generell zu verzichten. Für einen großen Anwendungsbereich von PlanGeoWP sind neben der monovalenten Betriebsweise die Regelungsstrukturen für den bivalent-parallelen, bivalent-teilparallelen und bivalent-alternativen Betrieb implementiert. Monoenergetische Systeme werden durch die parallele Regelstrategie abgebildet (vgl. [VDI 4650, 2019]). In Abbildung C.14 ist die Regelungsstruktur der parallelen Betriebsweise für den Heizungsmodus dargestellt.

Bei der parallelen Betriebsweise ist der zweite Wärmeerzeuger außerhalb von Sperrzeiten nur dann in Betrieb, wenn die Wärmepumpe eingeschaltet ist (vgl. Abbildung 2.8). Deshalb kann der Status des zweiten Wärmeerzeugers anhand der Regelungsstruktur der Wärmepumpe ermittelt werden. Bei Sperrzeiten besteht die Möglichkeit, dass der zweite Wärmeerzeuger während der Sperrung der Wärmepumpe angeschaltet ist [VDI 4645, 2018]. Ob das System diese Funktion abbilden kann, wird durch die Variable *secHeatGenOnInBlockingTime* bestimmt. Kann der zweite Wärmeerzeuger die Sperrzeit der Wärmepumpe überbrücken, wird

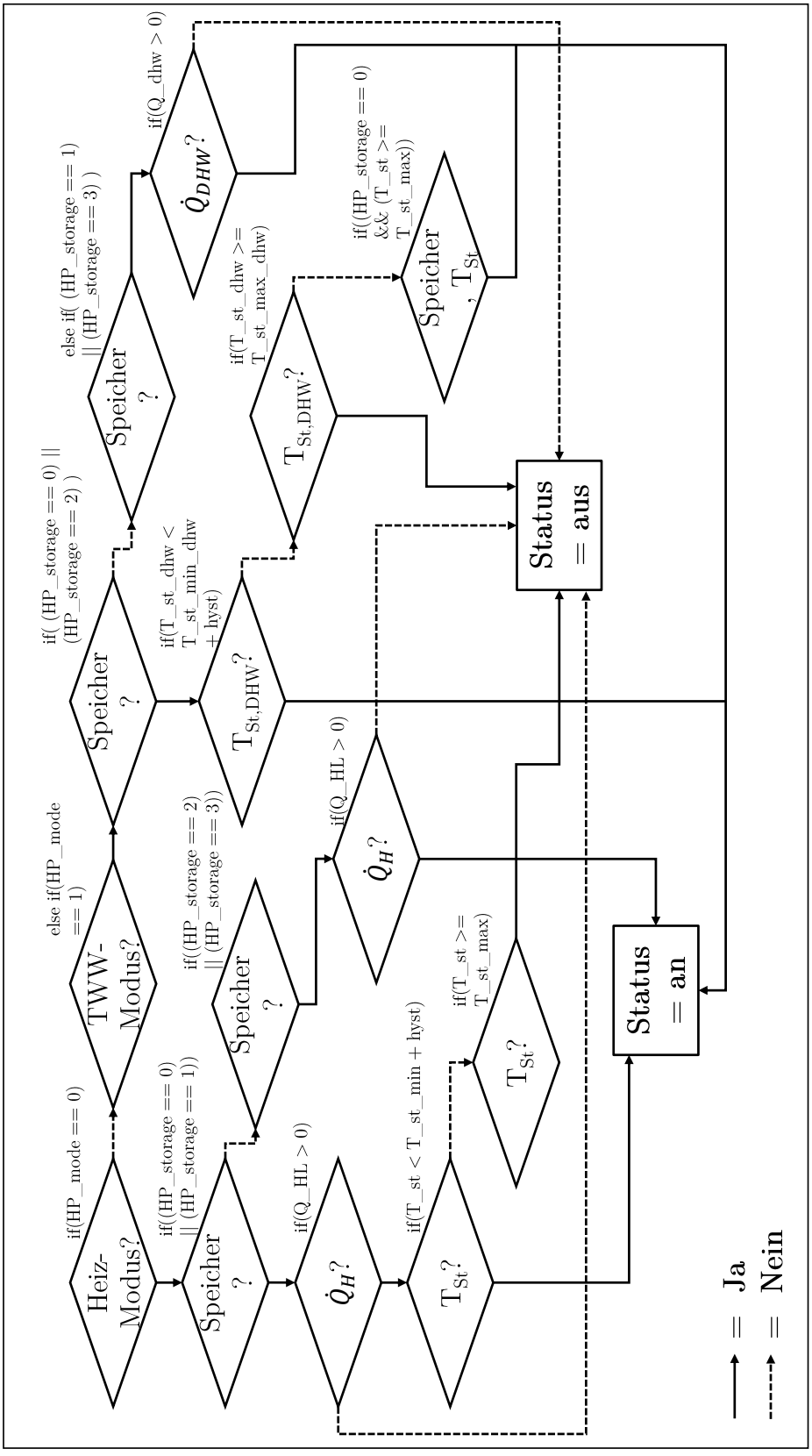


Abb. 3.15.: Regelungsstruktur für die *HPonControl*-Funktion

der Status der Wärmepumpe über die Funktion *HPonControl()* ermittelt und in Abhängigkeit des Status die Wärmeleistung des zweiten Wärmeerzeugers bestimmt. Anschließend wird die Wärmepumpe ausgeschaltet, da die Sperrung aktiv ist. Kann der zweite Wärmerzeuger in der Sperrzeit nicht eingeschaltet werden und die Sperrzeit ist aktiv, werden die Wärmeleistungen beider Erzeuger zu Null gesetzt. Liegt im aktuellen Zeitschritt keine Sperrung vor, wird der Wärmepumpenstatus anhand von Abfragen zu den kritischen Ausschaltbedingungen, Sperrzeiten und *secHeatGenOnInBlockingTime* über die Funktionen *HPonControl()* oder *HPonControlLoadStorageFull()* ermittelt.

Da ModHPS nicht nach der Außentemperatur, sondern nach den anstehenden Lasten regelt, werden für die Zuschaltung des zweiten Wärmeerzeugers für alle bivalenten Betriebsweisen die aktuellen Wärmeströme verglichen. Dazu wird die Summe aus der aktuellen Heizleistungsanforderung des Gebäudes und den Pufferspeicherverlusten mit einem Aufschlagfaktor multipliziert und das Produkt[5] mit der berechneten Wärmepumpenheizleistung verglichen. Der Aufschlag soll bei alleinigem Betrieb der Wärmepumpe gewährleisten, dass der Pufferspeicher geladen werden kann. Ist die berechnete Wärmepumpenheizleistung minimal größer als die Bivalenzleistung, würde der Speicher ohne einen Aufschlag sehr langsam geladen werden. Dieser Sachverhalt ist insbesondere für die Vollladung der Speicher vor der nächsten Sperrzeit der Wärmepumpe von Bedeutung. Als Aufschlag wurden vereinfacht zehn Prozent angesetzt.

Ist im parallelen Betrieb die berechnete Wärmepumpenheizleistung größer als die Bivalenzleistung, wird der zweite Wärmeerzeuger nicht zugeschaltet. Andernfalls sind beide Wärmeerzeuger parallel im Betrieb. Die Wärmeleistung des zweiten Wärmeerzeugers wird dann in Abhängigkeit des Wärmepumpenstatus entweder gleich dessen Nennleistung oder zu Null gesetzt.

Für den TWW-Modus wird im parallelen Betrieb die gleiche Regelungslogik angesetzt wie für das Heizen (siehe Abbildung C.15). Lediglich die Zuschaltung des zweiten Wärmeerzeugers wird anhand der TWW-Leistungsanforderung, der berechneten Wärmepumpenheizleistung für TWW und der TWW-Speicherverluste ermittelt.

Die Betriebsweisen bivalent-alternativ und bivalent-teilparallel werden in der Praxis selten eingesetzt und im Folgenden nur verkürzt beschrieben. Die Regelungsmechanismen der alternativen und teilparallelen Betriebsweisen sind im Anhang in den Abbildungen C.18, C.19, C.20, C.21, C.22 und C.23 dargestellt.

Bei der alternativen Betriebsweise ist entweder die Wärmepumpe oder der zweite Wärmeerzeuger in Betrieb (vgl. Abbildung 2.9). In der implementierten Regelungsfunktion wird der zweite Wärmeerzeuger angeschaltet, wenn die berechnete Wärmepumpenheizleistung kleiner oder gleich der Bivalenzleistung ist. Zusätzlich wird während Sperrzeiten, wie bei parallelen Betriebsweise, auch die Variable *secHeatGenOnInBlockingTime* geprüft.

[5] Das Produkt wird im Folgenden als Bivalenzleistung bezeichnet.

Die bivalent-teilparallele Betriebsweise ist eine Kombination aus parallelem und alternativem Betrieb (vgl. Abbildung 2.10). Im Gegensatz zur bivalent-alternativen Betriebsweise wird die Abschaltung der Wärmepumpe im teilparallelen Betrieb durch eine konstante und im Systemkonfigurator eingegebene Abschaltleistung (*shutDownHL*) bestimmt, die mit der aktuellen Heizleistungsanforderung verglichen wird. Wenn die aktuelle Heizleistungsanforderung kleiner als die Abschaltleistung ist, keine Sperrzeit aktiv ist und die aktuelle Wärmepumpenleistung kleiner gleich der Bivalenzleistung ist, sind die Wärmepumpe und der zweite Wärmeerzeuger zusammen in Betrieb. Die Abschaltleistung wird ausschließlich im Heizmodus abgefragt, da die Heizlasten i. d. R. größer sind als die TWW-Lasten. Demnach ist der zweite Wärmeerzeuger im TWW-Modus nur dann ohne die Wärmepumpe in Betrieb, wenn die Wärmepumpe geblockt ist und er in dieser Zeit die Lasten übernehmen kann. Ansonsten wird die TWE durch die Wärmepumpe alleine oder durch beide Wärmeerzeuger zusammen gedeckt.

Für die teilparallele und alternative Betriebsweise werden nach der Überprüfung des Abschaltpunktes der Wärmepumpenstatus und der Status des zweiten Wärmeerzeugers ermittelt. Dafür werden u. a. die kritischen Ausschaltbedingungen, das Vorhandensein von Sperrzeiten und die Sperrung im aktuellen Zeitschritt überprüft. Zusätzlich werden in der alternativen und teilparallelen Betriebsweise die Funktion *secHeatGenOnControl* (siehe Abbildung C.24) und bei einer Vollladung die Funktionen *SecHeatGenControlLoadStFull()* und *HPonControlLoadStorageFull()* (siehe Abbildungen C.7 und C.9) aufgerufen, um den Status des zweiten Wärmeerzeugers zu ermitteln, wenn er alleine für die Beheizung des Gebäudes bzw. zur Deckung des TWW-Bedarfs zuständig ist.

3.4.4.4. Entzugsleistung, Wärmequelleneintrittstemperatur und Leistungszahl

Im Anschluss an die Regelungsfunktionen wird die Funktion *QsoilTsoilinCOP()* aufgerufen (siehe Abbildung 3.9). In dieser Funktion wird die Wärmequelleneintrittstemperatur ($T_{\mathrm{Sole,ein}}$) anhand des Wärmepumpenstatus und einer Bilanz um den Verdampfer der Wärmepumpe wie folgt für jeden Zeitschritt t bestimmt:

$$T_{\mathrm{Sole,ein}} = T_{\mathrm{Sole,aus}} - \frac{\dot{Q}_{\mathrm{Boden}}}{\varrho_{\mathrm{Sole}} \cdot c_{\mathrm{Sole}} \cdot \dot{V}_{\mathrm{Sole}}} \tag{3.1}$$

Die Entzugsleistung aus dem Untergrund ($\dot{Q}_{\mathrm{Boden}}$) ergibt sich aus der berechneten Wärmepumpenheizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe. Die Dichte (ϱ_{Sole}) und die spezifische Wärmekapazität (c_{Sole}) werden durch die Solekonzentration vorgegeben und als konstant angesetzt. Wenn die Wärmepumpe ausgeschaltet ist, wird Gleichung 3.1 nicht ausgeführt, sondern $T_{\mathrm{Sole,ein}}$ mit $T_{\mathrm{Sole,aus}}$ gleichgesetzt und $\dot{V}_{\mathrm{Sole}}$ zu Null gesetzt. Die Eingangsdaten und berechneten Variablen der Funktion *QsoilTsoilinCOP()* sind in Abbildung C.25 aufgeführt.

3.4.4.5. Direkte geothermische Kühlung

Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann die Regeneration des Erdreichs über geothermische Gebäudekühlung Einfluss auf die Dimensionierung der geothermischen Quelle haben. Bei geothermischen Wärmepumpensystemen wird i. d. R. möglichst die direkte geothermische Kühlung genutzt, in der die Wärmepumpe ausgeschaltet ist. Um die Auswirkungen der geothermischen Kühlung auf die Quellendimensionierung und auf den Wärmepumpenbetrieb grob abbilden zu können, ist eine stark vereinfachte Regelung für die direkte geothermische Kühlung im Modell implementiert.

Die Funktion *cooling()* fragt als erstes den Anwendungsbereich jeder Wärmepumpeninstanz ab. Ist der Wärmepumpeninstanz ein Anwendungsbereich mit Kühlen sowie die direkte geothermische Kühlung zugeordnet, werden die Kühllast und die Wärmequellenaustrittstemperatur im aktuellen Zeitschritt überprüft. Liegt im aktuellen Zeitschritt eine Kühllast vor und ist die Wärmequellenaustrittstemperatur kleiner als eine vom Nutzer festgelegte Einsatzgrenze, wird der Wärmestrom berechnet, der in den Untergrund übertragen wird:

$$\dot{Q}_{\text{Boden}} = \dot{Q}_{\text{WP}} - P_{\text{el}} - \dot{Q}_K \tag{3.2}$$

Neben $\dot{Q}_{\text{WP}}$ und P_{el}, geht die Kühllast ($\dot{Q}_K$) in die Bilanz mit ein (siehe Formel 3.2). Dazu wird angenommen, dass die direkte geothermische Kühlung unabhängig vom Betriebsmodus nutzbar ist und die komplette Kühllast an den Boden abgegeben werden kann. In Abhängigkeit von der Höhe der Kühllast und des vom Nutzer eingegebenen Volumenstroms für direkte geothermische Kühlung ($\dot{V}_K$) erhöht sich $T_{\text{Sole,ein}}$:

$$T_{\text{Sole,ein}} = T_{\text{Sole,aus}} - \frac{\dot{Q}_{\text{Boden}}}{\varrho_{\text{Sole}} \cdot c_{\text{Sole}} \cdot max(\dot{V}_{\text{Sole}}, \dot{V}_K)} \tag{3.3}$$

Die Einsatzgrenze der direkten geothermischen Kühlung ist als eine maximale Wärmequellenaustrittstemperatur implementiert und wird vom Nutzer innerhalb des Systemkonfigurators eingegeben. Bei Überschreitung der Einsatzgrenze wird keine Leistung an den Untergrund übertragen, sodass der Jahresdeckungsanteil an der direkten geothermischen Kühlung sinkt. Die Eingangsdaten und berechneten Variablen der Funktion *cooling()* sind in Abbildung C.26 aufgeführt.

3.4.4.6. Speicherbilanz

In Abhängigkeit von den an die Wärmepumpe angeschlossenen Speichern berechnet die Funktion *storageBalance()* die Speichertemperaturen. Die Energiebilanzen um Puffer- und TWW-Speicher sind samt ein- und austretenden Wärmeströmen schematisch in Abbildung 3.16 dargestellt.

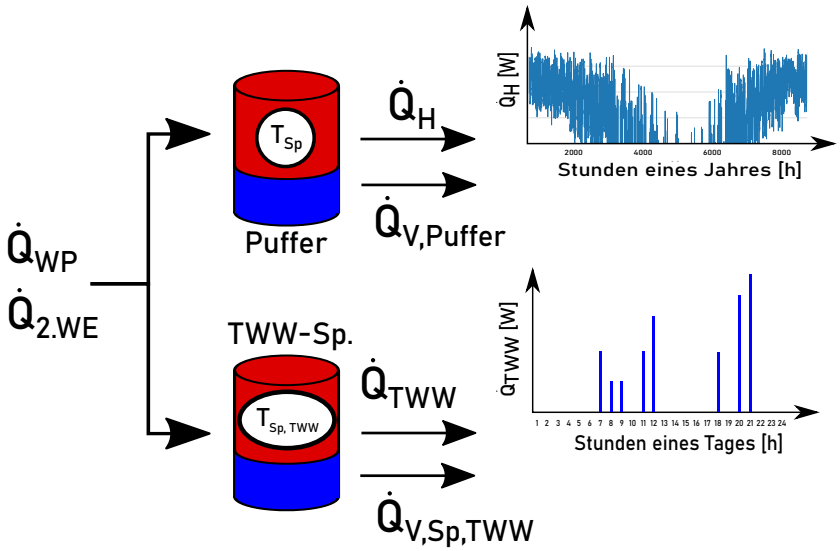


Abb. 3.16.: Speicherbilanzen mit ein- und austretenden Wärmeströmen

Die berechnete Wärmeheizleistung ($\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$) bzw. die Wärmeleistung des zweiten Wärmeerzeugers ($\dot{Q}_{2.\mathrm{WE}}$) wird je nach Betriebsmodus in einen ideal durchmischten Puffer- oder TWW-Speicher übertragen. Die Bilanzausgänge aus den Speichern entsprechen den von den Gebäuden angeforderten Wärmeströmen ($\dot{Q}_{\mathrm{H}}$ bzw. $\dot{Q}_{\mathrm{TWW}}$) und den Bereitschaftswärmeverlusten der Speicher ($\dot{Q}_{\mathrm{V,Puffer}}$ bzw. $\dot{Q}_{\mathrm{V,Sp,TWW}}$). $\dot{Q}_{\mathrm{H}}$ und $\dot{Q}_{\mathrm{TWW}}$ werden anhand der in den Gebäudeenergieberechnungen erstellten stundengenauen Lastkurven für TWW und Heizung für jeden Zeitschritt (t) bestimmt und den jeweiligen Speichern entzogen. Bei der Wärmeübertragung in die Speicher und aus den Speichern werden Wärmeübertragerverluste vernachlässigt. Die Bereitschaftswärmeverluste der Speicher werden über verschiedene Prüfzyklen vom Hersteller ermittelt und werden im Modell näherungsweise als konstante Wärmeverluste angesetzt. Jedem Speichertyp werden über dessen Auswahl im Systemkonfigurator konstante Bereitschaftswärmeverluste aus Herstellerangaben zugewiesen und über die XML-Datei ModHPS zur Verfügung gestellt. Mit den angeführten Vereinfachungen ergeben sich für den Puffer- und TWW-Speicher folgende thermische Leistungsbilanzen:

$$\frac{dU_{\mathrm{Puffer}}}{dt} = \dot{Q}_{\mathrm{WP}} + \dot{Q}_{2.\mathrm{WE}} - \dot{Q}_{\mathrm{H}} - \dot{Q}_{\mathrm{V,Puffer}} \tag{3.4}$$

$$\frac{dU_{\mathrm{Sp,TWW}}}{dt} = \dot{Q}_{\mathrm{WP}} + \dot{Q}_{2.\mathrm{WE}} - \dot{Q}_{\mathrm{TWW}} - \dot{Q}_{\mathrm{V,Sp,TWW}} \tag{3.5}$$

Die innere sensible Energie eines Wärmespeichers (U_{Sp}) ist allgemein durch Gleichung 3.6 definiert:

$$U_{\mathrm{Sp}} = \varrho_w \cdot c_w \cdot V_{\mathrm{Sp}} \cdot T_{\mathrm{Sp}} \tag{3.6}$$

Das Speichervolumen (V_{Sp}), die Dichte (ϱ_w) und die spezifische Wärmekapazität (c_w) von Wasser sind als konstant angenommen. Dadurch, dass in jedem Zeitschritt alle Ein- und Ausgänge der Energiebilanz bekannt sind und die Zeitschrittweite (Δt) ebenfalls konstant ist, kann die jeweilige Speichertemperatur über die Gleichungen 3.7 und 3.8 berechnet werden.

$$T_{\mathrm{Puffer}}(t) = T_{\mathrm{Puffer}}(t - \Delta t) + \Delta t \cdot \frac{\dot{Q}_{\mathrm{WP}}(t) + \dot{Q}_{2.\mathrm{WE}}(t) - \dot{Q}_{\mathrm{H}}(t) - \dot{Q}_{\mathrm{V,Puffer}}}{\varrho_w \cdot c_w \cdot V_{\mathrm{Puffer}}} \tag{3.7}$$

$$T_{\mathrm{Sp,TWW}}(t) = T_{\mathrm{Sp,TWW}}(t - \Delta t) + \Delta t \cdot \frac{\dot{Q}_{\mathrm{WP}}(t) + \dot{Q}_{2.\mathrm{WE}}(t) - \dot{Q}_{\mathrm{TWW}}(t) - \dot{Q}_{\mathrm{V,Sp,TWW}}}{\varrho_w \cdot c_w \cdot V_{\mathrm{Sp,TWW}}} \tag{3.8}$$

Aufgrund der vereinfachten Berechnungsweise mit resultierendem zeitschrittweise linearen Temperaturverlauf kann die berechnete Speichertemperatur innerhalb eines Zeitschritts die maximale Speichertemperatur überschreiten (siehe Abbildung 3.12a) bzw. die minimale Speichertemperatur unterschreiten. In diesen Fällen wird die Speichertemperatur korrigiert.

Bei einer Überschreitung der Temperaturobergrenze wird die berechnete Speichertemperatur auf die Temperaturstufe der Wärmepumpe begrenzt und nur die Energien berücksichtigt, die für die Erhöhung auf die Grenztemperatur notwendig sind (vgl. Abschnitt 3.4.4.1 und Abbildung 3.12a). Zusätzlich zur Speichertemperatur werden auch die berechnete Wärmepumpenheizleistung, die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und je nach Betriebsweise die Energie des zweiten Wärmeerzeugers korrigiert. Ist die Wärmepumpentemperaturstufe größer als die Nennvorlauftemperatur (Abbildung 3.12b), tritt dieser Effekt nicht so häufig auf, da die Differenz zwischen der Temperaturstufe der Wärmepumpe und der Nennvorlauftemperatur wie eine zusätzliche Hysterese wirkt.

Durch die implementierte Sommerabschaltung und die konstanten Speicherverluste kann die für die Regelung genutzte minimale Pufferspeichertemperatur unterschritten werden, wenn keine Heizleistungsanforderung vorliegt. Fällt die Speichertemperatur unterhalb der Umgebungstemperatur des Aufstellortes, wird die Speichertemperatur auf diesen Wert festgesetzt. Da die Speicher häufig in unbeheizten Räumen stehen, ist innerhalb von *storageBalance()* eine Umgebungstemperatur von 15 °C implementiert. Die minimale TWW-Speichertemperatur wird aufgrund der Vorrangschaltung für TWW i. d. R. nicht unterschritten.

Gerade bei großen Zeitschritten können durch den vereinfachten Ansatz Berechnungsungenauigkeiten entstehen. Generell nehmen die durch die Vereinfachungen entstehenden Ungenauigkeiten mit kleineren Zeitschritten ab. Aufgrund der stündlichen Gebäudelasten ist die Zeitschrittweite auf maximal eine Stunde begrenzt. Es wird empfohlen die Zeitschrittweite von ModHPS möglichst klein, im Bereich von 60 s bis 15 min, zu wählen.

In Abbildung C.27 sind die Eingangsdaten und Ergebnisse der Speicherbilanzen dargestellt. Da die Funktion *storageBalance()* prozedural nach den Regelungsstrukturen aufgerufen wird

(siehe Abbildung 3.9), werden für die Regelung der Wärmepumpe die Speichertemperaturen des vorhergehenden Zeitschritts herangezogen.

3.4.5. Simulationsergebnisse

Innerhalb der Modellentwicklung wurden u. a. für Plausibilitätsüberprüfungen eine Vielzahl an Berechnungen und Ergebnisparameter in ModHPS integriert. Zur Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Nutzung der Werkzeugkette werden die Simulationsergebnisse als Text- und PDF-Dateien automatisiert erstellt und gespeichert sowie teilweise in die XML-Datei geschrieben. Durch Simulationen erzeugte Kennzahlen wie z. B. die JAZ oder der Deckungsanteil der Wärmepumpe am Heizenergiebedarf können zur Überprüfung der im Systemkonfigurators berechneten Werte genutzt werden.

In Tabelle C.4 sind die Ergebnisparameter des Modells aufgelistet, die über den kompletten Simulationszeitraum bzw. für jedes Jahr gemittelt werden. Neben den Berechnungsergebnissen sind weitere Informationen zu dem Wärmepumpengerät, dem zweiten Wärmeerzeuger, der Betriebsweise, dem Einsatzbereich, der Simulation sowie den angeschlossenen Gebäuden, Speichern und Erdwärmesonden in den Textdateien enthalten. Auf die wichtigsten Simulationsergebnisse wird im Folgenden näher eingegangen.

Statisch ermittelte Jahresvolllaststunden werden in der Praxis häufig für vereinfachte Dimensionierungsberechnungen in der Vorplanung eingesetzt. Im Gegensatz dazu ist die von der Größe der installierten Wärmespeicher und weiteren Randbedingungen abhängige Laufzeit der Wärmepumpe eine wichtige Kenngröße, die mittels einer Simulation ermittelt und mit deren Hilfe die Dimensionierung des Gesamtsystems überprüft werden kann. In ModHPS wird die Jahresbetriebsdauer der Wärmepumpe anhand des Wärmepumpenstatus jedes Zeitschrittes für alle simulierten Jahre berechnet und im Postprocessing über den gesamten Betrachtungszeitraum gemittelt.

Neben der Betriebsdauer sind die Deckungsanteile der Wärmepumpe am Heiz-, TWW- und Kühlenergiebedarf des Gebäudes wichtige Planungsgrößen. Das Modell berechnet folgende Deckungsanteile der Wärmepumpe sowohl als Jahresmittel jedes simulierten Jahres als auch als Mittel über den gesamten Simulationszeitraum:

- Deckungsanteil der Wärmepumpe am Jahresenergiebedarf für Heizung
- Deckungsanteil der Wärmepumpe am Jahresenergiebedarf für TWW
- Deckungsanteil der Wärmepumpe am Jahresenergiebedarf für Heizung und TWW
- Deckungsanteil der direkten geothermischen Kühlung am Jahreskühlenergiebedarf

Für die Ermittlung der Deckungsanteile werden die von der Wärmepumpe gelieferten Energiemengen für Heizung und TWW sowie die aus dem Gebäude entzogene Energiemenge für Kühlung berechnet und der Summe aus den jeweiligen Gebäudebedarfen und Speicherverlusten über das Jahr gegenübergestellt. Für bivalente Systeme werden die jeweiligen Deckungsanteile (außer für Kühlung) zusätzlich für den zweiten Wärmeerzeuger berechnet.

Neben den jährlichen Deckungsanteilen sind in jedem Zeitschritt berechnete Leistungsanteile für Heizung und TWW ein weiteres Ergebnis von ModHPS, die insbesondere für detaillierte Analysen der implementierten Regelungsmechanismen genutzt werden können. Anhand des Einsatzbereichs, der aktuellen Gebäudelasten sowie der installierten Wärmespeichertypen und ihrer Speichertemperaturen werden die Heizleistungen der Wärmepumpe mit der aktuellen Gebäudelast bzw. die nutzbare Energie im Speicher mit der in diesem Zeitschritt entzogenen Energie aus dem Speicher verglichen. Dabei werden keine Speicherverluste berücksichtigt und vereinfacht angenommen, dass der Leistungsanteil hundert Prozent beträgt, falls die Speichertemperatur über der im Systemkonfigurator festgelegten minimalen Speichertemperatur liegt.

Die JAZ kann unter Nutzung verschiedener Systemgrenzen berechnet werden (siehe Kapitel 2.2). Die Vergleichbarkeit von Arbeitszahlen ist nur gewährleistet, wenn die gleiche Bilanz mit einheitlichen Systemgrenzen verwendet wird. In Anlehnung an die Bilanzgrenzen aus VDI 4645 und VDI 4650 (vgl. Abbildung 2.7) sowie an die Bestimmung der gemessenen JAZ aus Messwerten nach Miara et al. [2011] werden innerhalb von ModHPS die JAZ_{WP} und JAZ_{WPA} über folgende Formeln berechnet:

$$JAZ_{\mathrm{WP}} = \frac{E_{\mathrm{H}} + E_{\mathrm{TWW}}}{W_{\mathrm{el}}} \tag{3.9}$$

$$JAZ_{\mathrm{WPA}} = \frac{E_{\mathrm{H}} + E_{\mathrm{TWW}} + E_{\mathrm{H,HS}} + E_{\mathrm{TWW,HS}}}{W_{\mathrm{el}} + W_{\mathrm{el,SP}} + W_{\mathrm{H,HS}} + W_{\mathrm{TWW,HS}}} \tag{3.10}$$

Aus den über alle Zeitschritte eines Jahres aufsummierten Heizenergien der Wärmepumpe ergeben sich die durch die Wärmepumpe bereitgestellte Jahresenergiemenge für Heizung (E_{H}) bzw. TWW (E_{TWW}). Deren Summe wird zur Berechnung der JAZ_{WP} mit der elektrischen Arbeit (W_{el}) ins Verhältnis gesetzt, die der Verdichter der Wärmepumpe zum Betrieb benötigt. Durch die Verwendung von nach DIN EN 14511 genormten Herstellerdaten marktverfügbarer Wärmepumpen beinhaltet W_{el} indirekt auch die elektrische Energie von Hilfsaggregaten [VDI 4645, 2018]. Ist in dem Wärmepumpengerät zudem eine Soleumwälzpumpe enthalten, ist die elektrische Energie zum Betrieb der integrierten Soleumwälzpumpe ebenfalls anteilig in W_{el} enthalten. Die JAZ_{WPA} berücksichtigt zusätzlich die elektrische Arbeit einer externen Soleumwälzpumpe ($W_{\mathrm{el,SP}}$) sowie die elektrische Arbeit und die nutzbaren Wärmeenergiemengen für Heizung ($E_{\mathrm{H,HS}}$) und TWW ($E_{\mathrm{TWW,HS}}$) des Heizstabes im Falle einer monoenergetischen Betriebsweise. Unter der Annahme eines verlustfreien Heizstabes entsprechen die nutzbaren Wärmemengen des Heizstabes seinem elektrischen Energieaufwand. Beide JAZ werden sowohl für jedes Betriebsjahr als auch als Mittel über den gesamten

Simulationszeitraum berechnet. Die über die Simulationsdauer gemittelten Deckungsanteile und JAZ_{WPA} werden in die XML gespeichert und können vom Systemkonfigurator zur simulationsbasierten Überprüfung genutzt werden.

In Tabelle C.4 sind weitere Berechnungsergebnisse des ersten und letzten simulierten Jahres aufgelistet, die für jeden Zeitschritt in die Textdateien gespeichert werden. Die Textdateien sind die Grundlage für die automatisiert erstellten und im Folgenden vorgestellten Ergebnis-PDF-Dateien. Die Simulationsparameter und Randbedingungen der dargestellten Ergebnisdiagramme sind in Abschnitt C.10 enthalten.

Für das im Folgenden dargestellte Beispielszenario wird eine monoenergetisch betriebene Wärmepumpe mit einer Nennleistung von 7,5 kW (B0/W35) simuliert. Der Heizstab hat eine Nennleistung von 8,8 kW. Die Systemvorlauftemperaturen für Heizung und TWW betragen 35 °C und 55 °C. An ModHPS ist kein Untergrundmodell gekoppelt. Zur Darstellung von Auswirkungen der Grenzrandbedingung der Wärmepumpe wird die Wärmequellenaustrittstemperatur über den Simulationszeitraum, von anfangs 8 °C, stündlich bis auf −8 °C abgesenkt. Diese lineare Absenkung ist bewusst nicht real und dient an dieser Stelle nur der Anschauung. Der Betrachtungszeitraum beträgt beispielhaft zwei Jahre.

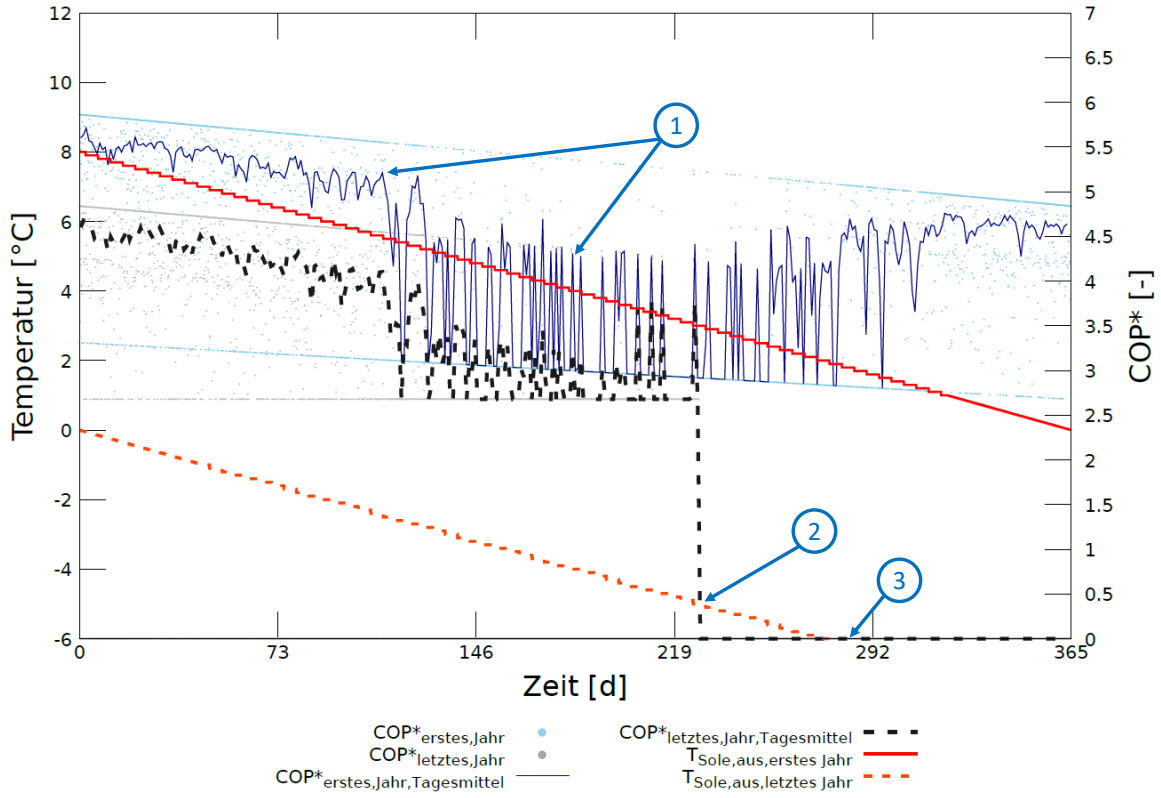


Abb. 3.17.: Wärmequellenaustrittstemperaturen sowie der Stunden- und Tagesmittelwert der Leistungszahlen aus jedem Zeitschritt (COP*) für das erste und letzte simulierte Jahr

In Abbildung 3.17 sind die Wärmequellenaustrittstemperaturen über den Stunden- und Tagesmittelwert der in jedem Zeitschritt berechneten Leistungszahlen (COP*) für das erste

und letzte simulierte Jahr dargestellt. COP* schwankt aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus im Heiz- und TWW-Modus und sinkt stetig mit der sinkenden Wärmequellenaustrittstemperatur. Außerhalb der Heizperiode treten vereinzelte und kleinere Heizleistungsanforderungen auf (vgl. Abbildung 3.18). In diesem Zeitraum ist der Anteil der TWE größer als in der Heizsaison und aufgrund des höheren Temperaturniveaus der TWE ist COP* niedriger (siehe Abbildung 3.17 Punkt 1). Im zweiten Jahr sinkt die Wärmequellenaustrittstemperatur unterhalb des kritischen Wertes von −5 °C (siehe Punkt 2), sodass in den folgenden Zeitschritten die Wärmepumpe ausgeschaltet bleibt und COP* durchgängig bei Null liegt (siehe Punkt 3). Aufgrund der unteren Grenzrandbedingung werden die Soletemperaturen nur bis −6 °C dargestellt.

Die Abbildungen 3.18, 3.19 und 3.20 werden im Postprocessing sowohl für das erste als auch das letzte simulierte Jahr erzeugt. Im Folgenden sind nur die Diagramme des ersten Simulationsjahres dargestellt. In Abbildung 3.18 sind die Speichertemperaturen als Stundenmittel sowie die Wärmequellenaustrittstemperatur, die Temperaturdifferenz des Wärmequelleneinund Wärmequellenaustritts, die Heizleistungsanforderungen und TWW-Leistungsanforderungen als Tagesmittel dargestellt. Die Speichertemperaturen schwanken regelungsbedingt im Bereich ihrer Minimal- und Maximalwerte. Im Sommer fällt die Pufferspeichertemperatur aufgrund der implementierten Sommerabschaltung unterhalb des Minimalwertes.

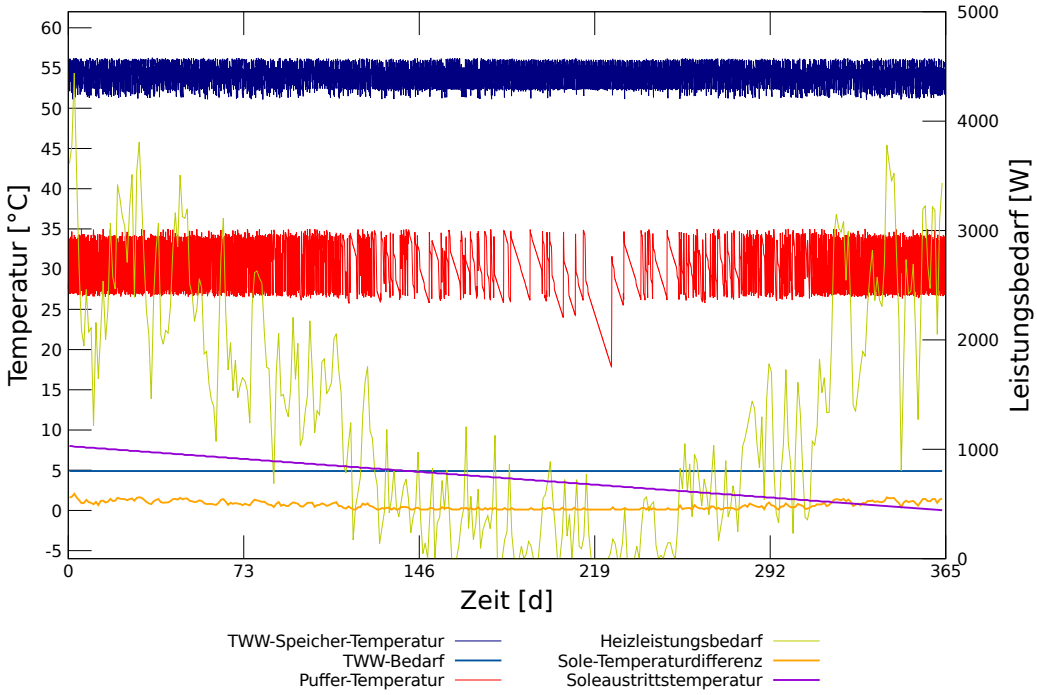


Abb. 3.18.: Temperatur- und Leistungsbedarfe über den Verlauf des ersten Simulationsjahres

Für genauere Analysen von z. B. Speicherladezyklen oder Wärmepumpentakten werden Diagramme für die Temperatur- und Leistungsverläufe eines einzelnen Tages sowie eines Zeitraumes von vier Stunden innerhalb dieses Tages erzeugt (siehe Abbildungen 3.19 und 3.20).

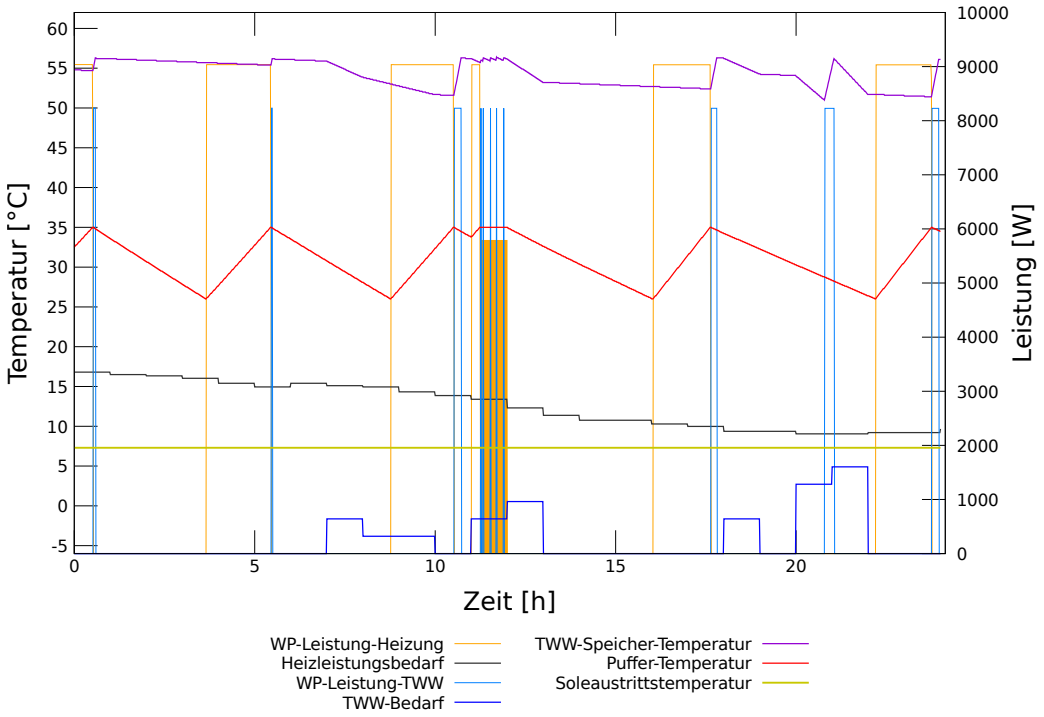


Abb. 3.19.: Temperatur- und Leistungsverläufe am ersten Februar des ersten Simulationsjahres

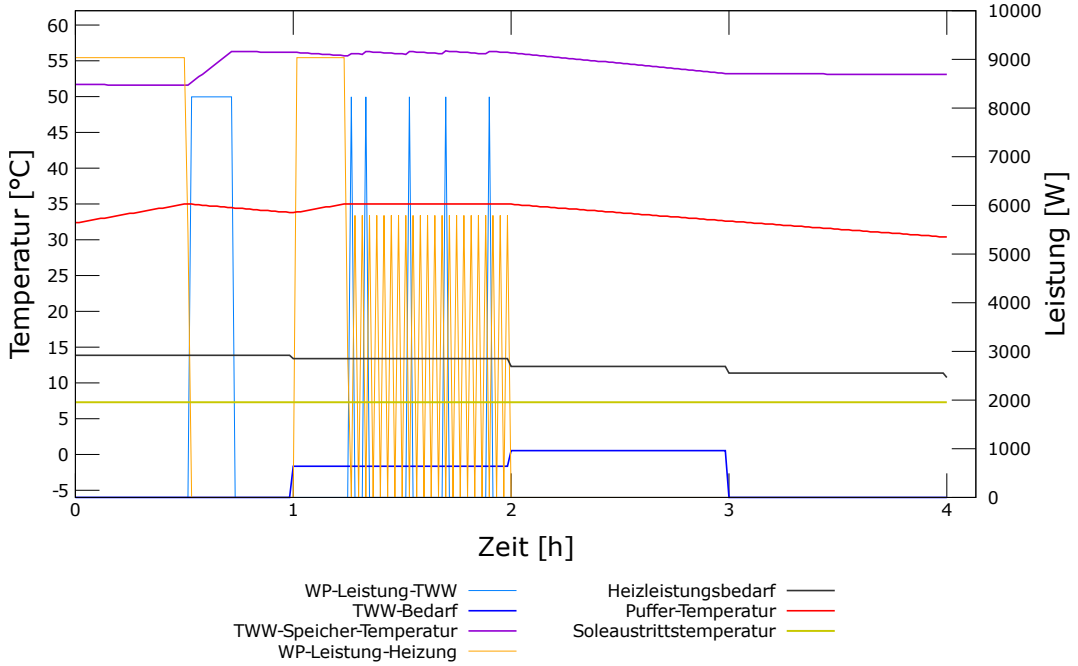


Abb. 3.20.: Temperatur- und Leistungsverläufe von 10:00 bis 14:00 Uhr am ersten Februar des ersten Simulationsjahres

Als Referenztag wurde der erste Tag im Februar ausgewählt, da der Februar aufgrund hoher Heizlasten sowie tiefer Außen- und Bodentemperaturen als kritischer Monat für die Planung von Erdwärmesonden herangezogen wird. Mit auftretenden Wärmeleistungen für Heizung bzw. TWW steigen die jeweiligen Speichertemperaturen. In beiden Abbildungen sind die Nachladung des TWW-Speichers im Anschluss an die Pufferspeicherbeladung sowie die Vollladung der Speicher von 11:00 bis 12:00 Uhr zu erkennen. In diesem Beispiel ist die Wärmepumpe von 12:00 bis 13:00 Uhr durch eine Sperrzeit zwangsabgeschaltet. Die Vollladung kann mit Abbildung 3.20 genauer analysiert werden. Wenn eine maximale Speichertemperatur bereits vor Beginn der Sperrzeit erreicht ist, wechselt die Wärmepumpe zur Nachladung der entsprechenden Speicher zwischen dem Heizungs- und TWW-Modus hin und her. Durch die Temperatur- und Leistungsbegrenzung der vereinfachten Speicherbilanz reduziert sich in diesen Zeiten die Heizleistung der Wärmepumpe.

Verschiedene Plausibilitätstests von ModHPS haben gezeigt, dass alle Regelungsmechanismen die erwarteten Kurvenverläufe der Speicher- und Wärmequelleneintrittstemperaturen sowie der Nutzwärmeleistungen der Wärmepumpe erzeugen. Neben zahlreichen Plausibilitätsüberprüfungen der Regelungsstrukturen wurden die im Modell simulierten JAZ mit Praxiswerten und der Berechn ung des SCOP nach VDI 4650 verglichen. Zusammenfassend liefert ModHPS realistische und plausible Ergebnisse. Nähere Informationen dazu sind in van Treeck et al. [2020] und Weck-Ponten et al. [2022] beschrieben.

Zusätzlich wurden die berechneten Heizleistungen der Wärmepumpe von ModHPS mit Daten aus Lorz u. van Treeck [2018] validiert. Trotz der Vereinfachungen von ModHPS konnte eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten gezeigt werden. Weitere Informationen zur Validierung und der verwendeten Daten sind in Weck-Ponten et al. [2022] beschrieben. Zukünftig ist eine Validierung des kompletten Modells und aller implementierten Betriebsweisen sowie Überprüfung der Speicherbilanzen mit weiteren Messdaten geplant.

3.4.6. Schnittstelle zu Untergrund- und Wärmenetzmodellen

In diesem Abschnitt werden die Schnittstellen beschrieben, die die bidirektionale Kopplung von ModHPS an die in GeTIS entwickelten Untergrundmodelle gewährleistet. Die Übergabeparameter der Kopplung von ModHPS an ein Untergrundmodell sind schematisch in Abbildung 3.21 dargestellt.

Der Volumenstrom der Wärmequellenanlage ($\dot{V}_{\mathrm{Sole}}$) sowie die Wärmequelleneintritts- ($T_{\mathrm{Sole,ein}}$) und die Wärmequellenaustrittstemperatur ($T_{\mathrm{Sole,aus}}$) dienen als Austauschparameter zwischen den Modellen. Das Untergrundmodell berechnet $T_{\mathrm{Sole,aus}}$ in jedem Untergrundzeitschritt und übergibt die Wärmequellenaustrittstemperatur jeder angeschlossenen Sonde in Form eines Vektors an ModHPS. Aufgrund der gleichmäßigen Aufteilung des Wärmequellenvolumenstroms auf die einzelnen an die Wärmepumpe angeschlossenen Erdwärmesonden

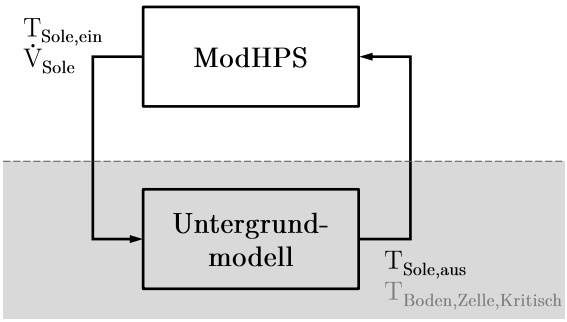


Abb. 3.21.: Schematische Darstellung der Kopplung von ModHPS an ein Untergrundmodell samt Übergabeparameter

(siehe Abschnitt 3.4.4) wird in ModHPS vereinfacht der arithmetische Mittelwert aller Temperaturen des Vektors zur Ermittlung von $T_{\text{Sole,ein}}$ genutzt. $T_{\text{Sole,ein}}$ und $\dot{V}_{\text{Sole}}$ werden in jedem Wärmepumpenzeitschritt an das Untergrundmodell übergeben.

Die Zeitschrittweiten der beiden Modelle sind meist unterschiedlich. Da die physikalischen Prozesse im Untergrund sehr träge sind, wird i. d. R. ein Zeitschritt von einer Stunde, manchmal auch eine adaptive Zeitschrittweite von bis zu mehreren Tagen [Sagerschnig et al., 2014], verwendet, um die Rechenzeit auf einem angemessenen Niveau zu halten. Im Gegensatz dazu arbeitet ModHPS mit Zeitschrittweiten von weniger als einer Stunde. Es wird empfohlen, die Zeitschrittweite von ModHPS im Bereich von einigen Sekunden bis Minuten zu wählen, um dynamische Effekte und das Steuerungsverhalten ausreichend abzubilden. Aufgrund der verschiedenen Zeitschrittweiten werden die Modelle unterschiedlich oft aufgerufen.

Zur Berücksichtigung von Grundwasserströmungen und der dynamischen Wechselwirkungen zwischen dem Wärmepumpensystem und der geothermischen Quellenanlage sowie zur Darstellung von Temperaturfahnen im Untergrund wurde ModHPS innerhalb von GeTIS bidirektional mit dem numerischen Untergrundmodell MPFluidGeTIS gekoppelt. Letzteres berechnet die einzelnen Bodenzellen um die Erdwärmesonde herum und übergibt zusätzlich zu $T_{\text{Sole,aus}}$ die kritische Bodenzelltemperatur ($T_{\text{Boden,Zelle,krit}}$), die zusammen mit einer vom Nutzer vorgegebenen Minimaltemperatur des Bodens zur Abschaltung der Wärmepumpe genutzt wird. Um einen schnellen Datenaustausch zu ermöglichen und zusätzliche Schnittstellen zu vermeiden, wurde der Programmcode von ModHPS in den Code von MPFluidGeTIS integriert. MPFluidGeTIS ruft die Funktionen aus *hplink.cpp* direkt auf, ohne *hps.cpp* zu nutzen (vgl. Abbildung 3.6). In diesem Fall ist MPFluidGeTIS das bestimmende und ModHPS das untergeordnete Modell. Weitere Details der Modellkopplung von ModHPS und MPFluidGeTIS sowie Beispielsimulationen sind in van Treeck et al. [2020] und Weck-Ponten et al. [2022] beschrieben.

Zusätzlich zu den grundlegenden Anforderungen aus Abschnitt 3.4.1 haben sich spezielle Anforderungen durch die Kopplung an das numerische Untergrundmodell innerhalb des Projektes GeTIS ergeben. So wurde ModHPS durch folgende Funktionalitäten erweitert:

- Möglichkeit, nicht-ganzzahlige Zeitschritte zu verwenden
- Umrechnung der Ergebniswerte im letzten Zeitschritt eines Jahres bei Zeitschritten, die kein Teiler von 3.600 s sind
- Integration von Funktionen, die das Löschen und Zwischenspeichern von Ergebnisparametern mehrerer aufeinanderfolgender Iterationen erlauben

Zur Abbildung der Kopplung an ein iteratives Modell wird der Iterationsstatus abgefragt. Wenn die Iterationsschleife der Untergrundsimulation erneut durchlaufen werden muss, werden die letzten Berechnungswerte entsprechend eines Iterationszählers aus den Ergebnisvektoren von ModHPS gelöscht und die notwendigen Variablen auf die gespeicherten Werte der letzten gültigen Iteration zurückgesetzt. Um die Rechenzeit der gekoppelten Simulation zu optimieren, wurde in ModHPS die Verwendung einer beliebigen Zeitschrittweite implementiert. Als Folge müssen die Ergebniswerte des letzten Zeitschritts eines Jahres angepasst werden, falls die Zeitschrittweite kein Teiler von 3.600 s ist.

Zur zukünftigen Kopplung von ModHPS an das in GeTIS entwickelte analytische Untergrundmodell wurde bereits eine Schnittstelle vorbereitet und teilweise im Code von ModHPS implementiert, die den Python-Code des Untergrundmodells innerhalb von *hps.cpp* aufrufen kann. In diesem Fall ist ModHPS das bestimmende Modell.

Neben der Kopplung an Untergrundmodelle, die Temperaturen und Volumenströme als Übergabeparameter haben, kann ModHPS auch mit Wärmenetzmodellen bidirektional gekoppelt werden. Die Übergabeparameter ändern sich durch die Kopplung an ein Wärmenetzmodell nicht. Lediglich die Verortung der Funktionen, welche die Parameter übergeben, können zwischen den Modellen wechseln. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, dass das Wärmenetz den Volumenstrom vorgibt und an ModHPS überträgt. Generell ist ModHPS beliebig erweiterbar, um solche Szenarien abzubilden.

3.5. Systemkonfigurator

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge bei der Planung oberflächennaher geothermischer Wärmepumpensysteme und der Vielzahl an Planungsparametern in den Bereichen Gebäude, TGA und TBA wurde der Systemkonfigurator für geothermische Wärmepumpensysteme entwickelt und prototypisch umgesetzt.

3.5.1. Einsatzbereiche, Zielgruppen und Anforderungen

Der Systemkonfigurator soll die Planung geothermischer Wärmepumpensysteme unterstützen. Dabei liegt der Fokus auf der detaillierten und gebäudescharfen Dimensionierung und

Konfiguration von Sole-Wasser-Wärmepumpen samt thermischen Speichern. Die primär betrachteten Haustechnikfunktionen sind die Gebäudebeheizung und die TWE. Der sommerliche Wärmeschutz soll vereinfacht über die direkte geothermische Kühlung berücksichtigt werden. Zudem umfassen die Einsatzbereiche sowohl Neu- als auch Bestandsbauten sowie Einzelgebäude und Quartierssysteme mit einer Vielzahl an Gebäuden.

Aufgrund der Berücksichtigung komplexer Zusammenhänge in der Dimensionierung sowie Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe, thermischen Speichern und der geothermischen Quellenanlage tangiert der Systemkonfigurator nicht nur die frühen Planungsphasen, sondern auch die Detailplanung.

Der Systemkonfigurator kann darüber hinaus als Baustein für die Erstellung von Machbarkeitsstudien und Systemvergleichen eingesetzt werden, um die Vorteile oberflächennaher geothermischer Systeme gegenüber konventionellen Erzeugern aufzuzeigen, geothermische Wärmepumpen als grundlastfähige Systembausteine in der Energiesystemplanung zu integrieren und damit die Wärmewende und Dekarbonisierung des Gebäudesektors voranzubringen.

Historisch bedingt bestehen mehrere Varianten des Systemkonfigurators. Der erste Ansatz des Konfigurators wurde in Microsoft Excel implementiert und in Weck-Ponten et al. [2021a] und Weck-Ponten et al. [2021b] als GeoWPSys bezeichnet. Details zu den im Excel-Werkzeug enthaltenen Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind in Eyhusen [2019] enthalten.

Das Excel-basierte Werkzeug wurde weiterentwickelt und in C++ als detailliertes Planungsprogramm in Form einer Desktopanwendung mit grafischer Nutzeroberfläche programmiert. Diese Variante des Systemkonfigurators wird im Folgenden als **GeoWPSys+** bezeichnet. GeoWPSys+ beinhaltet einen Berechnungskern (Core), der alle Berechnungen für die Dimensionierung beinhaltet und eine grafische Benutzeroberfläche, die verschiedene Nutzereingaben, die Auswahl von Betriebsweisen und die Anzeige von Ergebnissen ermöglicht. Weitere Details der Programmierung von **GeoWPSys+** sind in Böth [2021] enthalten.

Aufgrund der Komplexität von GeoWPSys+ wurde eine weitere Variante des Systemkonfigurators entwickelt: der webbasierte Konfigurator für geothermische Wärmepumpensysteme (**GeoWPSys+Web**) mit einer übersichtlichen und vereinfachten Nutzerführung sowie eingeschränkten Eingabemöglichkeiten und Funktionen. GeoWPSys+Web basiert auf dem Client-Server-Modell mit einem Web-Frontend auf der Client-Seite und einer Serverstruktur samt REST-API als Backend. Neben der angestrebten Komplexitätsreduktion ermöglicht GeoWPSys+Web u. a. andere Verstetigungsstrategien als die Desktopanwendung. Grundlagen zur Programmierung von GeoWPSys+Web sind in Weser [2021] und van Kempen [2022] enthalten.

Angesichts der verschiedenen Programmversionen lassen sich unterschiedliche Zielgruppen definieren. Die Zielgruppen von GeoWPSys+ sind u. a. Ingenieurbüros und Fachplaner, die mit den komplexen Zusammenhängen zwischen Untergrund, Gebäude- und Wärmepumpe umgehen können. Mit der Möglichkeit, Quartierssysteme vereinfacht gegenüberzustellen und zu analysieren, kann GeoWPSys+ auch im Bereich der kommunalen Wärmeplanung genutzt werden.

GeoWPSys+Web bedient vorwiegend die Zielgruppe der Entscheidungsträger wie z. B. Stadtwerke, Kommunen, Generalplaner oder Kontraktoren, die ein weniger spezialisiertes Fachwissen in den Bereichen TGA und TBA aufweisen und deswegen eine strikte Nutzerführung benötigen. Zusätzlich können auch Gebäudeeigentümer bei der Auswahl eines zukunftsfähigen, ökologischen und ökonomischen Wärmeerzeugers unterstützt werden. Durch die Möglichkeit, von einem Geoportal aufgerufen zu werden, kann GeoWPSys+Web auch in die Prozessketten von Genehmigungsbehörden und geologischen Diensten integriert werden, um das Antrags- und Genehmigungsverfahren zu erleichtern.

Der Systemkonfigurator ist unabhängig von der Programmvariante die zentrale Nutzerschnittstelle innerhalb von PlanGeoWP. Folgende grundlegende Anforderungen werden an den Konfigurator gestellt:

- Ermöglichung einer kombinierten Dimensionierung von Wärmepumpen, thermischen Speichern und dem geothermischen Quellensystem
- Ermöglichung von Systemvergleichen zwischen verschiedenen Wärmepumpensystemvarianten und einem konventionellen Erzeuger anhand von energetischen, technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertungsparametern:
  - Abbildung der gängigsten Wärmepumpenbetriebsweisen
  - Implementierung von detaillierten Wirtschaftlichkeitsanalysen
  - Implementierung von THG- und Primärenergiebilanzen
- Nutzerfreundliche Dimensionierung, Analyse und Bewertung der Systeme:
  - Hilfestellungen durch die Angabe von möglichst vielen Beispielwerten für die Nutzereingaben
  - Implementierung von im Hintergrund laufenden Berechnungen
  - Anzeige von Bewertungsparametern und Ergebnisdiagrammen ohne Latenzzeit
- Ermöglichung der Systemkonfiguration aus am Markt verfügbaren Komponenten:
  - Entwicklung einer XML-Struktur zur Anreicherung aller für die Konfiguration notwendigen Geräteinformationen von am Markt verfügbaren Komponenten (u. a. Wärmepumpen, Speicher, Heizstäbe, Brennwertkessel)
  - Import der Informationen aus der Komponenten-XML-Datei
- Automatisierte Ansteuerung von ModHPS, TEASER und SCoTED durch den Systemkonfigurator zur Unterstützung des Dimensionierungsprozesses in frühen Planungsphasen
- Export von XML-Dateien zur Speicherung der Ergebnisse und Eingabeparameter des Systemkonfigurators

- Import von XML-Dateien zur Bearbeitung von abgespeicherten Projekten und zur Nutzung der Simulationsergebnisse

Der Systemkonfigurator soll die Dimensionierung von Wärmepumpen, Puffer- und TWW-Speichern sowie der geothermischen Quellenanlage vereinen und anhand von am Markt verfügbarer Komponenten die Systemauswahl ermöglichen. Zur Findung des passenden Energiesystems eines Gebäudes sollen die gängigsten Wärmepumpenbetriebsweisen einem konventionellen Vergleichssystem gegenübergestellt werden.

Die Benutzeroberfläche des Systemkonfigurators und das Geoportal sollen die einzigen sichtbaren Anwendungen für den Nutzer sein. Unterstützende Berechnungen und automatisiert angestoßene Simulationen sollen im Hintergrund laufen. Durch den Import der Simulationsergebnisse von ModHPS sollen die internen Berechnungen überprüft und die Dimensionierung spezifiziert werden können. Für eine nutzerfreundliche Bedienung sollen möglichst viele Größen über Formeln und Berechnungsansätzen intern berechnet und als Hilfestellungen über Standardwerte oder Auswahllisten angegeben werden. Zudem ermöglicht die unmittelbare Darstellung von Parameteränderungen und Ergebnissen eine schnelle Konfiguration und Analyse der Systeme.

Im Folgenden werden die optimierte Nutzerführung, der Programmablauf, die Implementierungsstruktur und die graphische Benutzeroberfläche von GeoWPSys+Web detailliert beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt 3.5.3 auf die zusätzlichen Funktionen von GeoWPSys+ eingegangen.

3.5.2. GeoWPSys+Web

In Abbildung 3.22 ist die auf dem Client-Server-Modell basierende Programmarchitektur von GeoWPSys+Web dargestellt. GeoWPSys+Web besteht aus einem Web-Frontend mit Nutzerzugriff (dem Client) und der Serverstruktur samt einer REST-API als Backend. Somit ist die Applikation nicht lokal auf einem Computer gespeichert, sondern wird über ein Webbrowser-Programm vom Client via URL (Uniform Resource Locator) aufgerufen. Der Webbrowser nimmt mittels HTTP-Protokoll Verbindung über ein Netzwerk zum Server auf und erfragt Ressourcen per HTTP-Request. Die Ressourcen beinhalten HTML (Hypertext Markup Language), die vom Webbrowser interpretiert und in Form der angefragten Webseite auf dem Client dargestellt wird. Für das Frontend wird das JavaScript-Framework Vue.js und für das Backend die JavaScript-Laufzeitumgebung Node.js verwendet.

Clientseitig werden im Web-Frontend Eingaben getätigt, Berechnungen ausgeführt, Parameter angezeigt und Diagramme dargestellt sowie der XML-Import, der XML-Export und Simulationsaufträge mittels HTTP-Protokollen angestoßen. Die API verarbeitet die unterschiedlichen Aufträge, speichert die importierte XML-Datei, erweitert die XML-Datei mit den im Frontend getätigten Eingaben und den Simulationsergebnissen, parst die angereicherte XML-Datei und übergibt die Planungsparameter in Form einer vue.js-Datei zurück

an den Client. Neben den Webseiten-Ressourcen sind auf dem Server die Simulationsprogramme und Skripte zum automatisierten Aufrufen der Simulationen abgespeichert sowie Ordnerstrukturen für die Nutzer- und Sessionverwaltung angelegt.

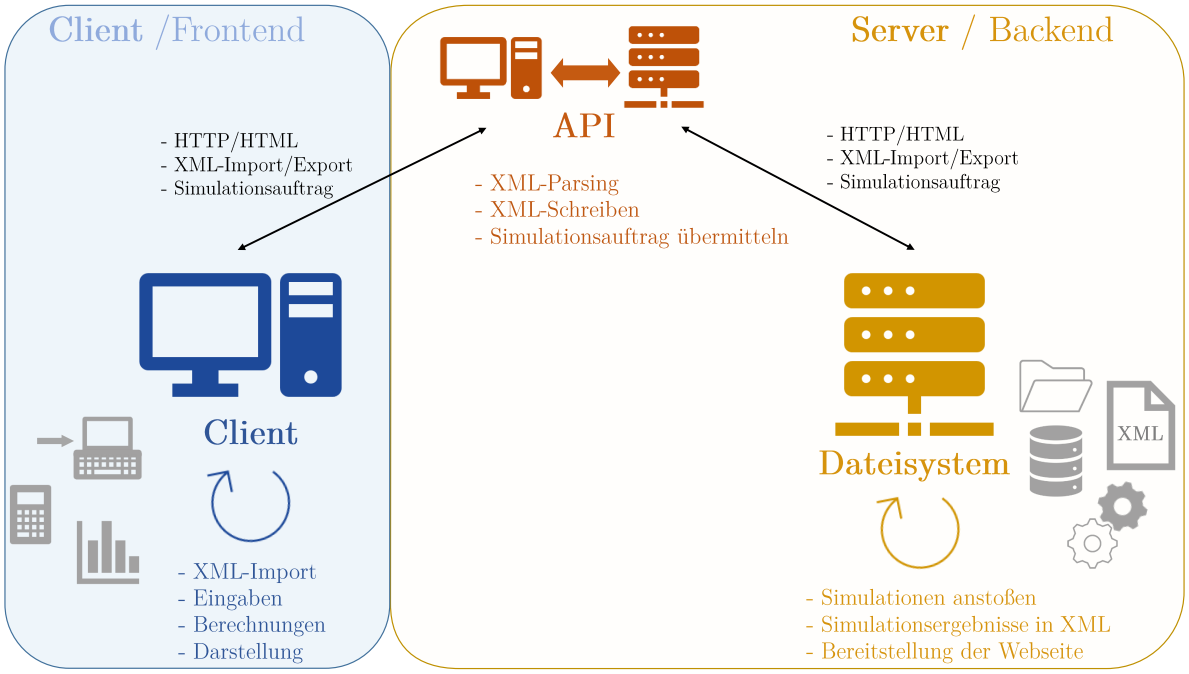


Abb. 3.22.: Client-Server-Architektur von GeoWPSys+Web

Weitere Details zur Programmierung von GeoWPSys+Web sind in [Weser, 2021] und [van Kempen, 2022] enthalten. Der detaillierte Programmablauf von GeoWPSys+Web ist in Abbildung 3.23 dargestellt und wird in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

3.5.2.1. Start des Konfigurators und XML-Import

Mit dem URL-Aufruf von GeoWPSys+Web wird serverseitig der initiale Verbindungsaufbau gestartet und ein Vue.js-Paket an den Client ausgeliefert. Das Paket enthält u. a. für die Konfiguration notwendige Geräteinformationen von am Markt verfügbaren Komponenten wie z. B. Wärmepumpen, Puffer- und TWW-Speicher, Umwälzpumpen, Heizstäbe, Gasbrennwertthermen und sonstige Komponenten. Diese Informationen werden aus der auf dem Server abgespeicherten Komponenten-XML-Datei bezogen. Aktuell sind in der Komponenten-XML-Datei exemplarisch die Daten des Herstellers STIEBEL ELTRON integriert. Die Daten können jederzeit herstellerübergreifend erweitert werden. Ein Beispiel des Aufbaus der Komponenten-XML ist in Anhang D.2 abgebildet.

Der Programmablauf von GeoWPSys+Web ist auf das übergreifende Softwarekonzept von PlanGeoWP und den Import einer Projekt-XML-Datei ausgerichtet. Standardmäßig wird die XML-Datei vom GeTIS-Geoportal generiert und mit gewissen Daten wie z. B. geologischen Informationen, Standortwetterdaten oder einer Liste mit ausgewählten Gebäuden und

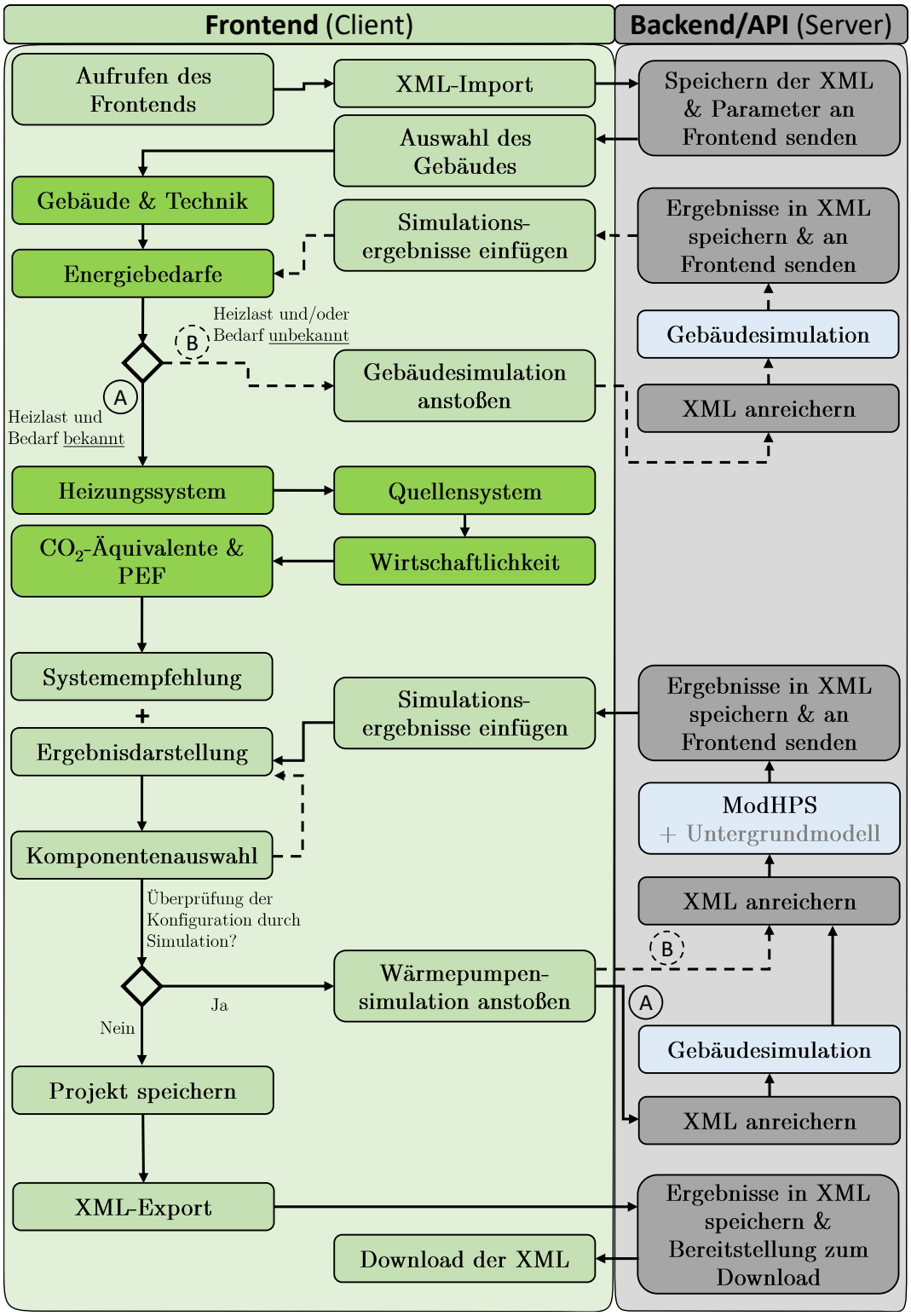


Abb. 3.23.: Sessionablauf von GeoWPSys+Web in Anlehnung an [van Kempen, 2022] (grün: Frontend; dunkelgrün: Dateneingaben im Frontend; grau: Backend; blau: Simulationen)

Erdwärmesonden angereichert. Abweichend dazu können clientseitig abgespeicherte XML-Dateien aus früheren Konfigurationen herangezogen werden. Die XML-Datei muss nach der in der vorliegenden Arbeit mitentwickelten Struktur aufgebaut sein (vgl. Abschnitt C.10.1). Die API legt die XML-Datei anhand eindeutiger IDs in die Ordnerstruktur auf dem Server ab, liest die Informationen der XML-Datei aus und übergibt sie an den Client.

Nach dem Import der XML-Datei erscheint die Hauptansicht von GeoWPSys+Web (siehe Abbildung 3.24). Im oberen Bereich der Dateneingabe wird eine Auswahlliste aller im Projekt enthaltenen Gebäude angezeigt. Nacheinander können alle Gebäude, die in der XML-Datei integriert sind, als Einzelsysteme konfiguriert werden. Im Anschluss an die Auswahl des Gebäudes erfolgt die Dateneingabe bzw. Datenergänzung.

3.5.2.2. Dateneingabe

Die Dateneingabe ist in mehrere Themenbereiche untergliedert, die nacheinander abgefragt werden:

- Gebäude und Haustechnik
- Energiebedarf
- Heizungssystem
- Quellensystem
- Wirtschaftlichkeit
- CO_2-Äquivalente und Primärenergiefaktoren

Alle Eingabe- oder Auswahlparameter der Dateneingabe sind im Anhang in den Tabellen D.1 bis D.8 aufgelistet bzw. in den Abbildungen F.1 bis F.6 dargestellt. Notwendige Informationen sind u. a. Gebäudedaten wie z. B. die Nettogrundfläche, die Gebäudeart, die Normheizlast, die Heizgrenztemperatur und der Energiebedarf für Heizung und TWW, Informationen zur Wärmepumpe wie z. B. die Verfügbarkeit eines Wärmepumpenstromtarifs oder das Vorhandensein von Sperrzeiten, Informationen bezüglich des geothermischen Quellensystems sowie Informationen bezüglich der Wirtschaftlichkeitsanalysen, Primärenergie- und THG-Bilanzen. Dem Nutzer werden Hilfestellungen zur erleichterten Bedienung durch Informationsbuttons mit erklärenden Texten, Hintergrundberechnungen sowie die Angabe von möglichst vielen Beispielwerten und Auswahllisten gegeben. Zusätzlich werden Parameterabhängigkeiten unmittelbar bei der Eingabe berücksichtigt. Alle Eingaben beziehen sich auf den Gebäudezustand vor dem Einbau bzw. Austausch des Heizungssystems oder einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle, was insbesondere für die Eingaben zum Gebäudeenergiebedarf und der Normheizlast relevant ist. Hat der Nutzer beispielsweise Verbrauchswerte des unsanierten Gebäudes, müssen die Werte für den Fall einer Sanierung der Gebäudehülle reduziert werden.

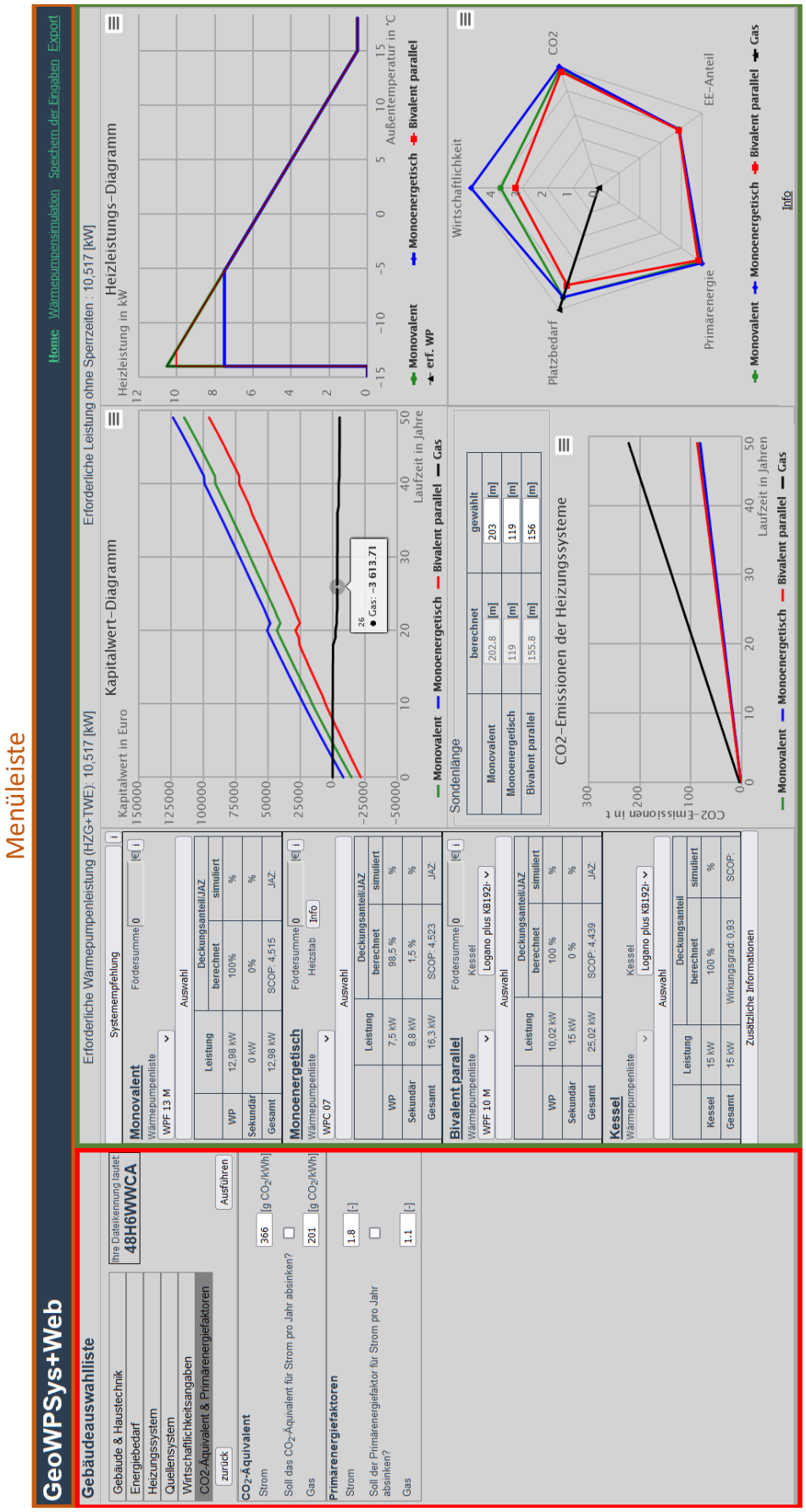


Abb. 3.24.: Hauptansicht von GeoWPSys+Web

In Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit werden dem Nutzer verschiedene Varianten der Energiebedarfseingabe über Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung gestellt. Die für die Konfiguration notwendigen Informationen sind der Nutzenergiebedarf für Heizung und TWW sowie die Normheizlast des Gebäudes. Liegen dem Nutzer die Informationen nicht oder nicht vollständig vor, können die fehlenden Daten über den automatisierten Anstoß von im Hintergrund laufenden Simulationen generiert werden. In Abhängigkeit von der Informationslage wird entweder die energetische Gebäudesimulation (TEASER-Workflow) oder der analytische Berechnungsansatz (SCoTED-Workflow) angestoßen (vgl. Abschnitt 3.3). Die für das jeweilige Gebäudeberechnungswerkzeug notwendigen Zusatzinformationen werden über ein Eingabefenster nutzerseitig ergänzt. Mit dem Klick auf den Simulationsbutton werden die eingegebenen Informationen serverseitig in die importierte XML-Datei geschrieben, das identifizierte Gebäudeberechnungsprogramm angestoßen, die Simulationsergebnisse in die XML-Datei gespeichert und an das Frontend übertragen (siehe Abbildung 3.23, Pfad B). Liegen alle notwendigen Eingaben zum Energiebedarf und zur Heizlast vor, wird ohne den Anstoß der Gebäudeberechnungswerkzeuge fortgefahren (siehe Abbildung 3.23, Pfad A).

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Steigerungen bzw. Absenkungen des Strom- und Gaspreises, der CO_2-Bepreisung sowie der CO_2-Äquivalente und Primärenergiefaktoren für Strom und Gas über den Betrachtungszeitraum der Dimensionierung geothermischer Quellenanlagen von 50 Jahren zu berücksichtigen. Der Nutzer kann dazu entweder konstante Änderungsraten vorgeben oder die entsprechenden Werte für jedes Jahr über eine Eingabemaske anpassen. Dadurch können zukünftige Einflüsse wie z. B. der steigende Anteil erneuerbarer Energien im Strommix oder die steigende CO_2-Bepreisung innerhalb der Wirtschaftlichkeits- und Ökologieanalysen abgebildet werden.

3.5.2.3. Erforderliche Erzeugerleistung

Parallel zur Dateneingabe wird die erforderliche Wärmepumpenleistung nach VDI 4645 (siehe Gleichung 2.7 in Abschnitt 2.5.2) im Hintergrund berechnet. Die erforderliche Wärmepumpenleistung bildet den kritischsten Auslegungsfall bei Normaußentemperatur ab. Neben der Normheizlast nach DIN EN 12831 und dem Tagesenergiebedarf für TWW werden auch sonstige Tagesenergiebedarfe für z. B. die Beheizung eines Schwimmbades sowie Sperrzeiten berücksichtigt.

Nach ELTRON [2019] sind Energieversorger, die einen vergünstigten Wärmepumpenstromtarif anbieten, berechtigt, die Wärmepumpe maximal dreimal täglich für höchstens zwei Stunden am Stück abzuschalten. Zusätzlich muss die Dauer ohne Sperrung mindestens so lange sein wie die vorangegangene Sperrzeit [Buderus, 2022]. Anhand dieser Praxisbegrenzungen ist eine maximale, über den Tag verteilte Sperrdauer von sechs Stunden in GeoWPSys+Web einstellbar. Die daraus resultierende Tagessperrdauer wird in der Berechnung der erforderlichen Wärmepumpenleistung berücksichtigt.

Sind alle für die Berechnung notwendigen Parameter bekannt, wird die erforderliche Wärmepumpenleistung sowohl inklusive als auch exklusive Sperrzeiten angezeigt.

3.5.2.4. Methodik der Systemvergleiche und automatisierte Systemempfehlung

Zur Findung des geeigneten Energiesystems eines Gebäudes werden die gängigsten Wärmepumpenbetriebsweisen sowohl untereinander als auch einem konventionellen Vergleichssystem gegenübergestellt. Für jede Systemvariante werden Bewertungsparameter berechnet und angezeigt. Folgende Systeme werden betrachtet:

- Monovalentes Wärmepumpensystem
- Monoenergetisches Wärmepumpensystem
- Bivalent paralleles Wärmepumpensystem mit einem Gas-Brennwertkessel
- Gas-Brennwertkessel

Nach der Dateneingabe wird, anhand der erforderlichen Wärmepumpenleistung, den hinterlegten Herstellerkomponentendaten und weiteren Parametern, eine Dimensionierungsempfehlung für jedes Einzelsystem automatisiert berechnet und dargestellt, sodass der Nutzer einen ersten Überblick über mögliche Systemvergleiche erhält. Anschließend können die vorgeschlagenen Wärmepumpen, Heizstäbe, Puffer- und TWW-Speicher und das Gasbrennwertgerät beliebig variiert werden. Ein Systemempfehlungsbutton ermöglicht jederzeit das Zurücksetzen der gewählten Konfigurationen auf die Systemempfehlung.

Im Falle der Variante des monovalenten Wärmepumpensystems wird ein Wärmepumpengerät vorgeschlagen, dessen Nennleistung mindestens so groß ist wie die berechnete erforderliche Wärmepumpenleistung. Die Wärmepumpennennleistung wird in Abhängigkeit von der Wärmequellenaustrittstemperatur von 0 °C und der Heizungstemperaturstufe des Wärmepumpengeräts bestimmt, da i. d. R. die Heizungsanforderungen die Dimensionierung bestimmen. Die Temperaturstufen für Heizung und TWW werden anhand des Heizwärmeübergabesystems, der Eingaben zu den Nennvorlauftemperaturen für Heizung und TWW sowie der verfügbaren Temperaturstufen der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Herstellerleistungskurven automatisiert ermittelt.

Bei dem monoenergetischen und bivalent parallelen System kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Für eine hohe JAZ sollte, insbesondere für monoenergetische Systeme, der Deckungsanteil der Wärmepumpe am Gesamtenergiebedarf möglichst groß bzw. der Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers möglichst gering sein. In Koenigsdorff [2011] wird für monoenergetische Systeme eine Begrenzung des energetischen Heizstabanteils auf fünf Prozent empfohlen. Der Deckungsanteil am Jahresheizwärmebedarf von monoenergetisch und bivalent parallel betriebenen Wärmepumpen wird in Anlehnung an VDI 4650 [2019] bzw. VDI 4645 [2018] anhand des Leistungsanteils der Wärmepumpenheizleistung bei der Normaußentemperatur in Bezug zur Normheizlast tabellarisch bestimmt. Dadurch, dass es keine direkte Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und Erdreichtemperatur gibt (vgl. Abschnitt 2.1), sondern Letztere eher vom Anlagenbetrieb und von der Dimensionierung des Gesamtsystems aus Wärmepumpe und geothermischer Quellenanlage

abhängt, wird für die Wärmepumpenheizleistung die Nennleistung im Auslegungspunkt bei einer Wärmequellenaustrittstemperatur von 0 °C und der zugeordneten Heizungstemperaturstufe der Wärmepumpe herangezogen. Anhand des Leistungsanteils von mindestens 65 % bzw. 60 % werden das monoenergetische und das bivalent parallele System dimensioniert, um den Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers gering zu halten (vgl. [Weck-Ponten et al., 2021a]). Der Deckungsanteil am Jahresenergiebedarf für TWW wird in Anlehnung an VDI 4650 [2019] und VDI 4645 [2018] dem Heizungsdeckungsanteil gleichgesetzt.

Zusätzlich werden bei der Systemempfehlung monoenergetischer und bivalenter Systeme weitere Randbedingungen der Herstellerdaten berücksichtigt. Beispielsweise sind bivalente Systeme bei den integrierten Herstellerdaten erst ab einer bestimmten Leistungsklasse der Wärmepumpen möglich (vgl. Anhang D.2; Eintrag *heat_pump:bivalent_possible*).

3.5.2.5. Ergebnisdarstellung

Gleichzeitig mit der Systemempfehlung wird die Systemübersicht angezeigt, in der alle Ergebnisse in Tabellen- oder Diagrammform dargestellt werden (siehe Abbildung 3.25).

Im linken Bereich der Ergebnisübersicht unterhalb des Systemempfehlungsbuttons sind die Wärmepumpenleistung, die Leistung des zweiten Wärmeerzeugers und die Gesamtleistung sowie der berechnete SCOP, die simulierte JAZ und der Deckungsanteil am Jahresheizwärmebedarf für die einzelnen Systemvarianten tabellarisch gegenübergestellt.

Der SCOP wird anhand der Systemgrenze der Wärmepumpenanlage (WPA), in Anlehnung an VDI 4650 [2019], für Erdwärmesonden mit einer minimalen Wärmequellenaustrittstemperatur von 2 °C berechnet (vgl. Abschnitt 2.2). Die SCOP-Berechnung basiert auf Vereinfachungen und Annahmen (siehe [VDI 4650, 2019]). Zur Überprüfung dieses Schlüsselparameters kann die JAZ mithilfe von ModHPS simulationsbasiert ermittelt werden.

Dem Nutzer werden über Einfärbungen betreffender Zellen Warnungen angezeigt, wenn z. B. die Gesamtnennleistung des Systems kleiner ist als die berechnete erforderliche Leistung, wenn der Heizstabanteil des monoenergetischen Systems fünf Prozent überschreitet oder wenn der Leistungsanteil der Wärmepumpe unterhalb von 20 Prozent liegt[6].

Darüber hinaus kann sich der Nutzer über den Button *Zusätzliche Informationen* eine Systemvergleichsmatrix mit weiteren Bewertungsparametern und Informationen anzeigen lassen (siehe Abbildung D.1). Neben grundlegenden Informationen, wie z. B. den Nennleistungen der Wärmepumpe und des zweiten Wärmeerzeugers oder dem SCOP bzw. dem Kesselwirkungsgrad, werden der Jahresnutzenergiebedarf, Wärmeverluste, die Jahresendenergiebedarfe für Strom und Gas, Investitionskosten sowie der Primärenergiebedarf, die Energiekosten,

[6]Der Wertebereich unterhalb von 20 Prozent wird in der Tabelle nach VDI 4650 [2020] nicht abgebildet. Die Tabelle in der nicht korrigierten Fassung bildet den Wertebereich nur bis 30 Prozent ab [VDI 4650, 2019].

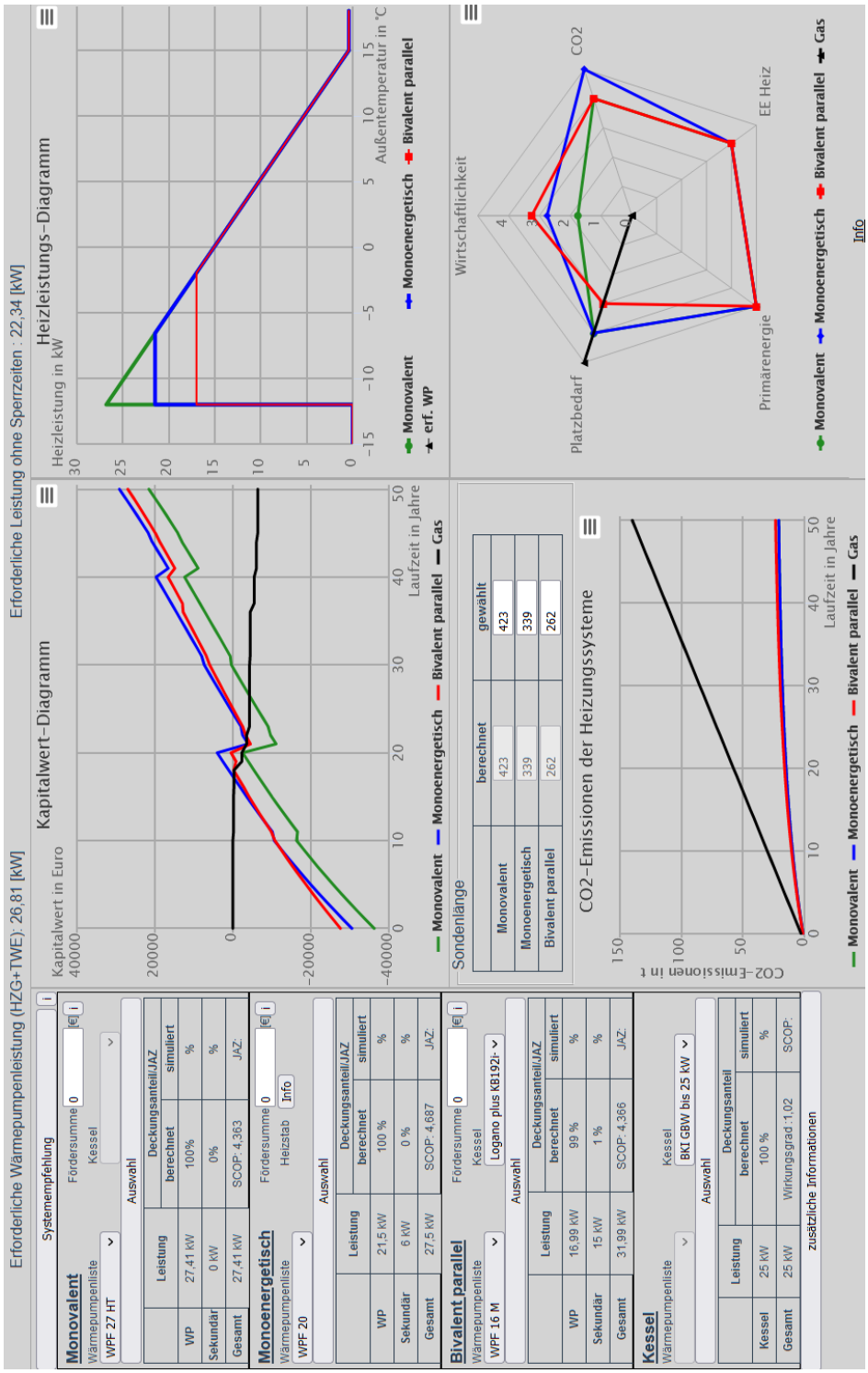


Abb. 3.25.: Screenshot der Ergebnisübersicht von GeoWPSys+Web

THG-Emissionen und deren Kosten jeweils für das erste und fünfzigste Jahr berechnet und dargestellt.

Im rechten Bereich der Ergebnisübersicht sind vier Diagramme sowie eine tabellarische Auflistung der berechneten und gewählten Erdwärmesondenlängen abgebildet. Für die Visualisierung der Diagramme wird die JavaScript-Bibliothek Highcharts[7] verwendet. Durch cursersensitive Diagramme und klicksensitive Legenden werden dem Nutzer zusätzliche Informationen und Analysemöglichkeiten bereitgestellt. Beispielsweise können einzelne Systemvarianten ein- und ausgeblendet oder die X- und Y-Werte der Punkte auf den Kurven angezeigt werden. Darüber hinaus kann jedes Diagramm in unterschiedlichen Dateiformaten abgespeichert werden. In den folgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Diagramme genauer eingegangen.

Der Programmablauf nach Abbildung 3.23 wird beim ersten Aufruf des Frontends prozedural durchlaufen. Nach dem Einblenden des Ergebnisbereichs kann die prozedurale Abfolge durchbrochen und beispielsweise einzelne Parameter der Dateneingabe geändert werden, um Auswirkungen auf die Einzelsysteme zu analysieren[8]. Somit kann der Nutzer das Gebäude bzw. die Systeme beliebig konfigurieren. Die Auswirkungen von Parameter- oder Systemkomponentenvariationen werden unmittelbar in der Ergebnisübersicht angezeigt.

Dimensionierungsdiagramm

Im rechten oberen Bereich der Ergebnisansicht ist das Dimensionierungsdiagramm platziert (siehe Abbildung 3.26), ein Hilfsdiagramm zur Dimensionierung der Wärmepumpensysteme in Anlehnung an Abschnitt 2.5.2 und Abbildung 2.8.

Innerhalb des Dimensionierungsdiagramms werden die Systemvarianten anhand der außentemperaturabhängigen Wärmeerzeugerleistungsabgaben und des linearen Verlaufs zwischen der erforderlichen Wärmepumpenleistung bei der Normaußentemperatur und der Heizleistung des Erzeugers bei der Heizgrenztemperatur gegenübergestellt (siehe Abschnitt 2.5.2). Bei Temperaturen über 15 °C wird in diesem Beispiel nicht mehr geheizt. In dem Bereich wird der außentemperaturunabhängige TWW-Leistungsbedarf angezeigt (siehe Formel 2.7). Die Bivalenzpunkte des monoenergetischen und parallelen Wärmepumpensystems ergeben sich aus den vorgeschlagenen bzw. ausgewählten Wärmepumpengeräten und deren Nennleistungen.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in GeoWPSys+Web ist die Bereitstellung einer Entscheidungshilfe zur Wahl eines Wärmeerzeugungssystems auf der Grundlage von ökonomischen Randbedingungen. Diesbezüglich sollen fallbasierte und komponentenspezifische Kostenbetrachtungen von unterschiedlichen Systemvarianten ermöglicht werden.

[7] Es ist auf die entsprechenden Lizenzregeln zu achten: https://shop.highcharts.com/license.

[8] Bei der nachträglichen Änderung der Energiebedarfe bzw. der Normheizlast gilt es zu beachten, dass bei vorherigem Einsatz der Gebäudeberechnungswerkzeuge die stundengenauen Lastkurven neu erstellt werden müssen.

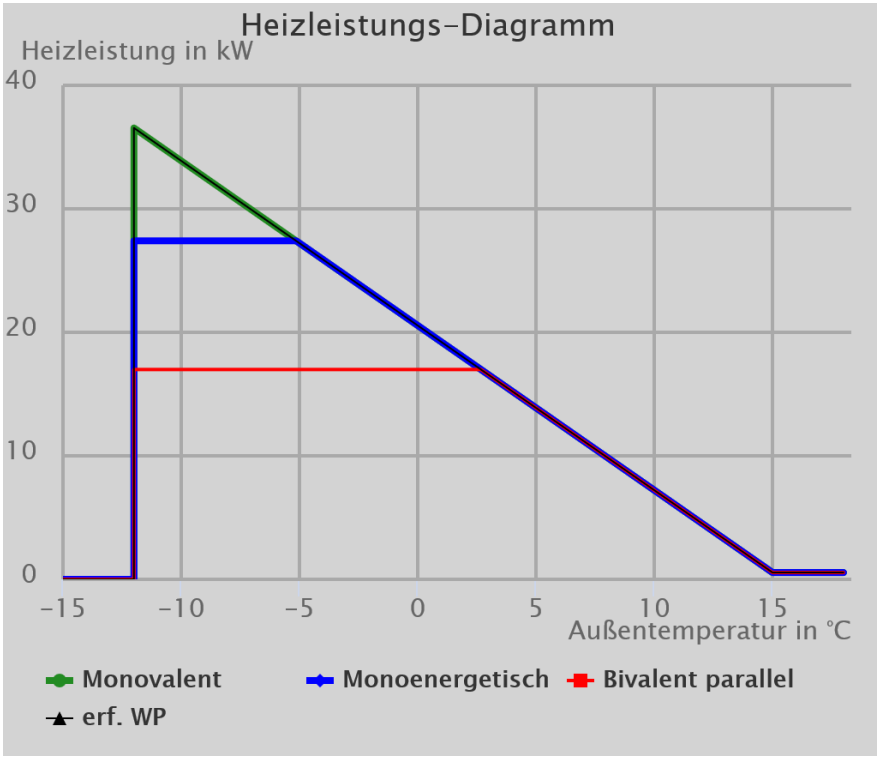


Abb. 3.26.: Screenshot des Dimensionierungsdiagramms von GeoWPSys+Web bei einer Normaußentemperatur von −12 °C und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C

Zur detaillierten Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanlagen, für beispielsweise Machbarkeitsstudien oder Systemvergleiche, sind entsprechende Berechnungsverfahren anzuwenden. Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Methoden unterschieden. In statischen Verfahren wird eine Periode betrachtet, die auf Durchschnittswerten der Kosten und Erlöse beruht. Dadurch werden weder die zeitliche Struktur noch Veränderungen der zukünftigen Kosten berücksichtigt.

In dynamischen Methoden werden anstelle von Durchschnittswerten sowohl zeitlich gebundene als auch zeitlich veränderliche Zahlungsströme über eine festgelegte Betrachtungsdauer angesetzt. Die Zahlungsströme unterliegen zusätzlich Preisänderungsfaktoren und werden auf einen spezifischen Zeitpunkt abgezinst, um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Zeitpunkte der Zahlungen zu berücksichtigen [Thommen et al., 2020]. Dadurch sind mehrperiodische Betrachtungen samt Preissteigerungen und Ersatzinvestitionen möglich. Unter den dynamischen Verfahren stehen die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode und die interne Zinssatzmethode zur Verfügung [Thommen et al., 2020].

In GeoWPSys+Web wird die Kapitalwertmethode unter Nutzung von Differenzinvestitionen genutzt. Differenzinvestitionen ergeben sich aus dem Vergleich mehrerer Investitionsvarianten, die durch unterschiedliche Nutzungsdauern oder Kapitaleinsätze geprägt sind [Thommen et al., 2020]. Dabei werden zu jedem Zeitpunkt die Differenzen von Ein- und Auszahlungen zwischen den Wärmepumpensystemvarianten und dem Gasbrennwertsystem gebildet. Die Kapitalwerte werden in Anlehnung an VDI 6025 [2012] nach Formel 3.11 berechnet:

$$K = -I + \sum_{t=1}^{t_{\text{end}}} z \cdot (1+j)^{t-1} \cdot (1+i)^{-t} \tag{3.11}$$

Der Kapitalwert K wird über die Betrachtungsperiode aufsummiert und berücksichtigt den Investitionsbetrag I, die jährlichen Differenzen der Ein- und Auszahlungen z zum Zeitpunkt t, den Kalkulationszinssatz i sowie zukünftige Preisänderungen j der jeweiligen Ein- und Auszahlungen, die in Abhängigkeit von der Kostenart und von z. B. des Energieträgers angesetzt werden. Anhand des Kalkulationszins werden die zukünftigen Zahlungsströme auf den Betrachtungsbeginn abgezinst.

Die Kostenarten unterscheiden sich nach VDI 2067 [2012] in kapitalgebundene, bedarfsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten. Kapitalgebundene Kosten setzen sich hauptsächlich aus einmaligen Investitionen und Ersatzinvestitionen für technische Anlagenteile, zugehörige Bauteile und Anschlusskosten zusammen. Bedarfsgebundene Kosten enthalten insbesondere die Zahlungen für die Energienutzung, die anhand des Jahresenergiebedarfs und der Energiepreise ermittelt werden. Betriebsgebundene Kosten beinhalten u. a. Wartungs-, Reinigungs-, Inspektions- und Bedienungskosten der technischen Anlagen [VDI 2067, 2012]. Zu den Sonstigen Kosten gehören u. a. Aufwände für Versicherungen, allgemeine Abgaben oder nicht erfasste Steuern [VDI 2067, 2012].

Bezüglich der kapitalgebundenen Kosten für Investitionen und Ersatzinvestitionen werden in GeoWPSys+Web Kosten aus Herstellerkatalogen für die Wärmepumpe, Heizstäbe, das Gasbrennwertgerät, Pufferspeicher, TWW-Speicher, Zubehör wie z. B. Umwälzpumpen oder Ausdehnungsgefäße sowie zusätzliche, vom Nutzer zu spezifizierende Investitionskosten berücksichtigt. Die auswählbaren Wärmepumpen, Heizstäbe, Puffer- und TWW-Speicher stammen exemplarisch aus dem Produktprogramm der Firma STIEBEL ELTRON und die Gas-Brennwertkessel der Serie Logano und vereinzelt auch TWW-Speicher aus dem Produktkatalog von Buderus. Zusätzlich sind gemittelte Kostenangaben für Wärmeerzeuger und Erdwärmesonden aus BKI [2018] hinterlegt. Darüber hinaus sind beispielsweise Kosten für den Bau eines Schornsteins für Neubauten oder Kosten für den Ersatz von Heizkörpern im Falle eines Bestandsgebäudes integriert. Beim Heizkörperaustausch wird das Alter des bestehenden Heizwärmeübergabesystems berücksichtigt und die Zeitpunkte für Ersatzinvestitionen dementsprechend angepasst. Die Nutzungsdauern der Anlagenkomponenten und des Heizwärmeübergabesystems sind nach VDI 2067 [2012] angesetzt. Förderungen werden durch einen einmaligen Investitionszuschuss über eine Nutzereingabe abgebildet. Montage- und Lieferungskosten oder Rabatte werden nicht berücksichtigt. Die Kosten für eine energetische Sanierung der Gebäudehülle sind, aufgrund des Fokus von GeoWPSys+Web auf das Wärmepumpensystem, nicht Bestandteil der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Die bedarfsgebundenen Kosten ergeben sich aus dem Energiebedarf für Heizung und TWW, der JAZ, dem Kesselwirkungsgrad, den angesetzten Übergabe-, Verteil- und Speicherverlusten, dem Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers, den Tarifen für die Energieträger Gas und Strom, den Preisänderungen für Gas- und Stromtarife sowie der CO_2-Bepreisung von

Gas. Die bedarfsgebundenen Kosten werden direkt durch die Systemeffizienz beeinflusst, sodass die JAZ bei Wärmepumpensystemen schon in frühen Planungsphasen möglichst genau ermittelt werden sollte.

Die betriebsgebundenen Kosten für die Wärmepumpe und den Gas-Brennwertkessel werden im Web-Frontend vorgeschlagen und vom Nutzer gegebenenfalls angepasst. Zusätzlich wird eine konstante Preissteigerung der Betriebskosten berücksichtigt. Alle Wirtschaftlichkeitsparameter sind in der Tabelle D.7 aufgelistet und in Abbildung F.5 dargestellt.

Bezüglich der Änderungen des Strom-, Gas- und CO_2-Preises werden dem Nutzer detaillierte Eingaben in Form einer Eingabetabelle ermöglicht, die den Preis jedes Jahres der Betrachtungsdauer anzeigt. Die Tabellen für den Strom- und Gaspreis werden im ersten Schritt anhand eines konstanten Änderungsfaktors erstellt. Anschließend kann der Nutzer jeden Jahreswert ändern. Die CO_2-Preistabelle berücksichtigt neben diesem Aufbau zusätzlich die gesetzlich vorgegebenen Werte bis zum Ende des Jahres 2025. Die Strompreis- und CO_2-Preistabelle sind in den Abbildungen D.2 und D.3 dargestellt.

In Abbildung 3.27 ist ein Beispiel der Wirtschaftlichkeitsanalyseergebnisse als zeitlicher Verlauf der Kapitalwerte jeder Systemvariante über den Auslegungszeitraum geothermischer Erdwärmesondensysteme von 50 Jahren dargestellt.

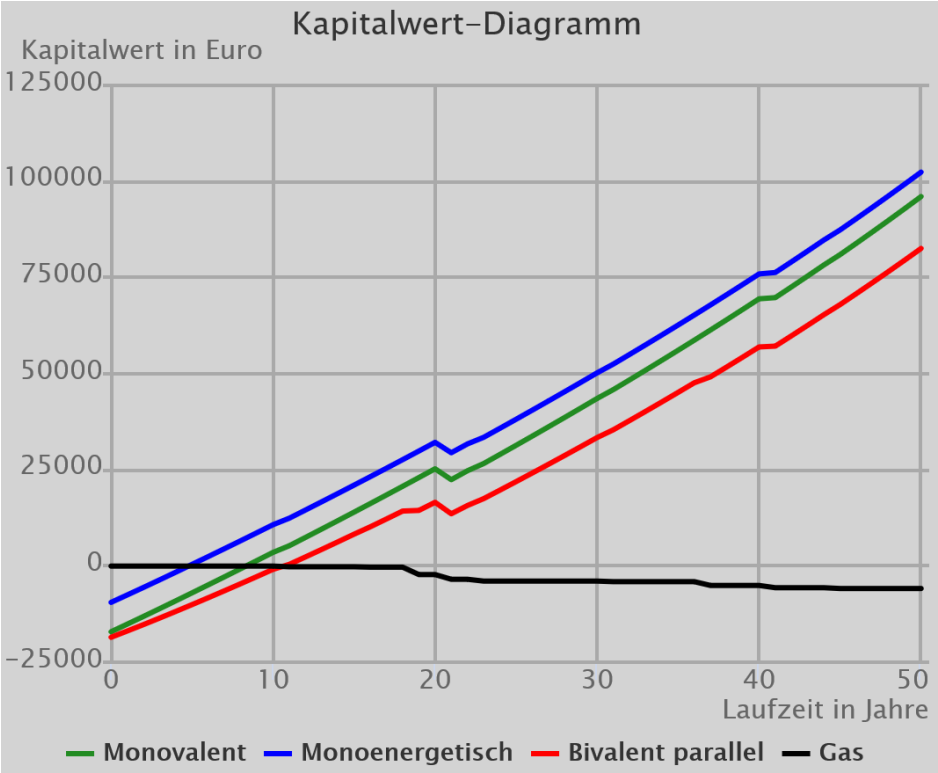


Abb. 3.27.: Screenshot des Ergebnisdiagramms der Wirtschaftlichkeitsanalyse von GeoWPSys+Web

Aufgrund der Aufsummierung der Jahreskapitalwerte ist eine Darstellung als Diagramm möglich, in dem veränderte Zahlungsströme, etwa durch Ersatzinvestitionen, im zeitlichen

Kontext abgebildet werden können. Ersatzinvestitionen werden zu Darstellungszwecken nicht als Zahlungsdifferenzen angesetzt, sondern bei jeder Variante separat berücksichtigt. Durch die Betrachtung von Zahlungsdifferenzen zum Vergleichssystem ist der Kapitalwert der Gasbrennwerttherme zu Betrachtungsbeginn gleich Null. Infolge der bei jeder Variante separat berücksichtigten Ersatzinvestitionen sinkt der Kapitalwertverlauf des Gas-Brennwertkessels schrittweise unterhalb der Nulllinie.

Die Investitionen der Wärmepumpensysteme sind in diesem Beispiel höher als die des Gasbrennwertsystems. Folglich sind deren Kapitalwerte zu Betrachtungsbeginn negativ. Verschieden ausgeprägte Steigungen der Wärmepumpenverläufe resultieren u. a. aus Unterschieden der JAZ, der Deckungsanteile der Wärmepumpe am Energiebedarf, Preisänderungen der Strom- und Gastarife oder der CO_2-Bepreisung. Durch die geringe Latenzzeit der Ergebnisdarstellung können verschiedenste Einflüsse unmittelbar nach Änderungen der Eingabeparameter analysiert werden.

Liegt der Kapitalwert eines Systems zu einem beliebigen Zeitpunkt oberhalb des Kapitalwertes des Gas-Brennwertkessels, ist es für diesen Zeitpunkt wirtschaftlicher als das Vergleichssystem. Der erste Schnittpunkt eines Wärmepumpenkapitalwertverlaufs mit dem des Vergleichssystems ergibt die Erstamortisation dieses Systems. Das Diagramm bietet, neben der Darstellung der Erstamortisation oder der Kapitalwerte zum Ende des Betrachtungszeitraumes, die Möglichkeit zur Bestimmung der globalen Amortisation im Falle von mehreren Schnittpunkten einer Kapitalwertkurve mit der Vergleichskurve. Der globale Amortisationszeitpunkt ist der letzte Schnittpunkt der betrachteten Kapitalwertkurve mit der Gasbrennwertkurve, nachdem alle folgenden Kapitalwerte oberhalb der Vergleichskurve liegen. Aus den vorgenannten Kriterien kann die wirtschaftlichste Systemvariante über den gesamten Zeitraum bestimmt werden.

THG-Bilanzierung

Die THG-Emissionen der einzelnen Systemvarianten werden über die Jahresendenergiemengen und die CO_2-Emissionsäquivalente der einzelnen Energieträger berechnet. Für elektrischen Strom können zukünftig variierende CO_2-Äquivalente, z. B. aufgrund eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien im deutschen Strommix, berücksichtigt werden. Ähnlich wie im Kapitalwertdiagramm werden die THG-Emissionen über den kompletten Betrachtungszeitraum dargestellt (siehe Abbildung 3.28).

Im hier dargestellten Beispiel wurde eine jährliche Reduzierung der CO_2-Emissionsäquivalente für Strom angesetzt, sodass die Kurven der Wärmepumpensysteme über den Betrachtungszeitraum abflachen.

Weitere Bewertungsparameter

Das letzte Diagramm der Ergebnisübersicht stellt ausgewählte Entscheidungsparameter für geothermische Wärmepumpensysteme in einem Netzdiagramm gegenüber (siehe Abbildung 3.29), die sowohl für Einzelgebäude als auch für Quartiersbetrachtungen einsetzbar sind. Die

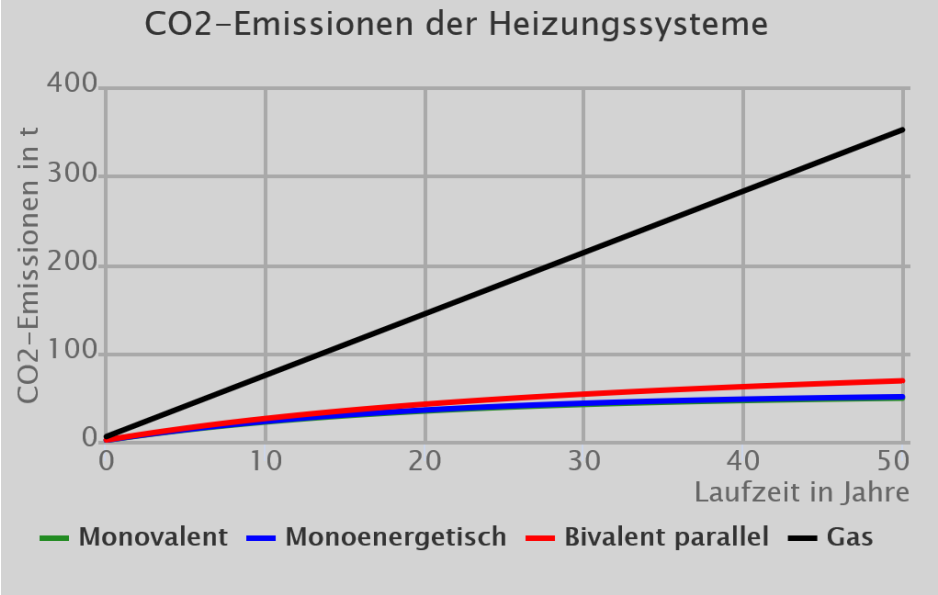


Abb. 3.28.: Screenshot des THG-Diagramms in GeoWPSys+Web

Werte der Entscheidungsparameter ergeben sich aus Wichtungskriterien und Randbedingungen. Der Wert Null entspricht dem geringsten Erfüllungsgrad des Bewertungsparameters und Wert Fünf dem höchsten Erfüllungsgrad.

Zusätzlich zum THG-Emissionsdiagramm werden die *THG-Emissionen* im Netzdiagramm visualisiert. Dem System mit den geringsten, über den kompletten Betrachtungszeitraum summierten THG-Emissionen ($CO_{2,min}$) wird der größte Wert im Netzdiagramm zugeteilt. Der Variante mit den höchsten Emissionen ($CO_{2,max}$) wird entsprechend der kleinste Skalenwert zugeordnet. Die anderen Systemvarianten werden entsprechend ihrer THG-Emissionen ($CO_2(x)$) im Vergleich zum System mit den höchsten THG-Emissionen bewertet und in Relation zur größten Mengendifferenz der CO_2-Emissionsäquivalente und dem Maximum der Skala ($S_{\max}$; entspricht für das Netzdiagramm gleich fünf) visualisiert (siehe Formel 3.12).

$$S = S_{\max} \cdot \frac{CO_{2,max} - CO_2(x)}{CO_{2,max} - CO_{2,min}} \tag{3.12}$$

Der nicht-erneuerbare Anteil der *Primärenergie*[9] und die Kapitalwerte des letzten Betrachtungsjahres werden nach der gleichen Vorgehensweise bewertet. Für den Bewertungsparameter *Wirtschaftlichkeit* werden die zugeordneten Skalenwerte der Kapitalwerte aufgrund der Länge des Betrachtungszeitraums und der damit verbundenen Unsicherheiten mit 25 % gewichtet. Zusätzlich werden die globalen Amortisationszeitpunkte der einzelnen Varianten berechnet. Anschließend werden sie nach Tabelle D.9 bewertet und mit 75 % gewichtet. Die vorgenannte Methode impliziert den Wert Null für die Variante mit dem niedrigsten Kapitalwert nach 50 Jahren Betrachtungszeit.

[9]Im Folgenden wird der nicht-erneuerbare Anteil der Primärenergie der Einfachheit halber nur als Primärenergie bezeichnet.

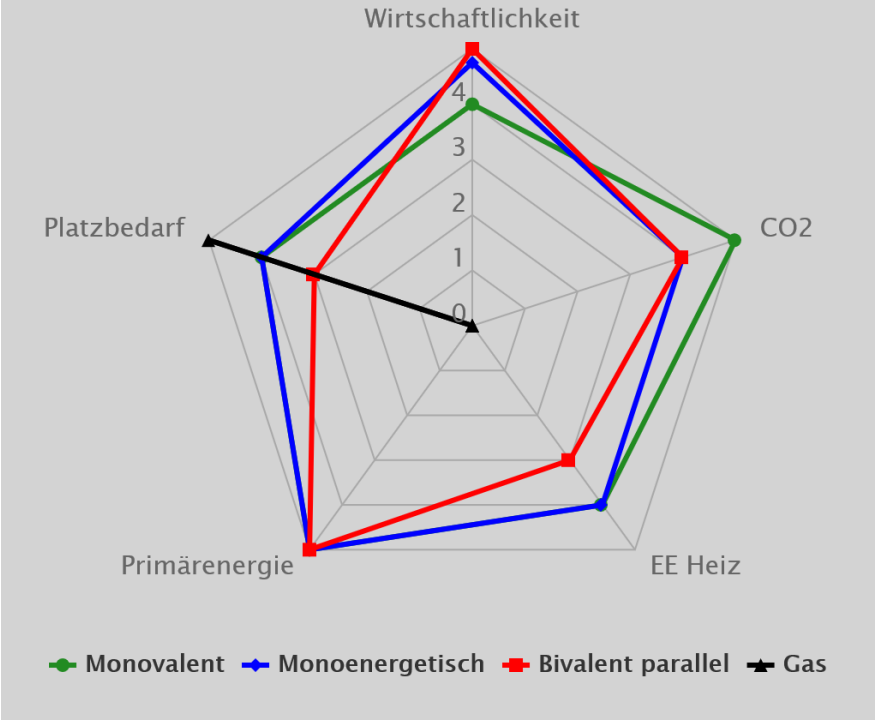


Abb. 3.29.: Screenshot des Netzdiagramms in GeoWPSys+Web mit ausgewählten Entscheidungsparametern

Der Deckungsanteil erneuerbarer Energien (D_{EE}) an der Erzeugernutzwärmeabgabe für Heizung (Q_{H}) und TWW (Q_{TWW}) wird vereinfacht über den Energieanteil bestimmt, der aus dem Erdboden bezogen wird (Q_{Boden}). Somit hängt der Anteil erneuerbarer Energien von der JAZ der Wärmepumpe (JAZ_{WPA}) und dem Deckungsanteil des fossilen Wärmeerzeugers im bivalenten Betriebsfall ($D_{\mathrm{foss,biv}}$) ab. Die Umrechnung des erneuerbaren Energieanteils in den Anzeigewert des Netzdiagramms erfolgt ebenfalls anhand des Maximalwertes der Skala (S_{max}):

$$D_{\mathrm{EE}} = S_{\mathrm{max}} \cdot \frac{Q_{\mathrm{Boden}}}{Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{TWW}}} = S_{\mathrm{max}} \cdot (1 - D_{\mathrm{foss,biv}}) \cdot (1 - \frac{1}{JAZ_{\mathrm{WPA}}}) \tag{3.13}$$

Der Deckungsanteil einer monoenergetisch betriebenen Wärmepumpe am Gesamtenergiebedarf ist nach VDI 4650 [2019] in der Berechnung des SCOP bereits enthalten (siehe Gleichung 2.4 und Abschnitt 3.4.5) und muss nicht gesondert berücksichtigt werden. Für den Betrieb des Gasbrennwertgeräts wird ausschließlich der Einsatz von fossilem Erdgas angenommen, sodass dem Vergleichssystem der Wert *0* zugeordnet wird. Der Bezug von gebäudenah erzeugtem regenerativen Strom oder eines THG-neutralen Stromtarifs wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Die Bewertung des *Platzbedarfs* auf dem Grundstück und im Gebäude erfolgt nach der Aufteilung aus Tabelle D.10. Der geringste Platzbedarf entspricht dem höchsten Skalenwert im

Netzdiagramm. Die Einteilung des Platzbedarfs berücksichtigt bereits zukünftige Erweiterungen der Konfiguratorfunktionalitäten, beispielsweise zur Abbildung von anderen Wärmequellenarten wie Fernwärme oder Erdwärmekollektoren.

Bei sonstigen zukünftigen Erweiterungen des Systemkonfigurators um z. B. Kühlung oder die Abbildung von gebäudenah erzeugtem PV-Strom ergeben sich neue Abhängigkeiten und Möglichkeiten in den Bewertungsparametern.

3.5.2.6. Komponentenauswahl

Im Anschluss an die Systemempfehlung und Ergebnisdarstellung erfolgt im Sessionablauf nach Abbildung 3.23 die Komponentenauswahl. Bei jeder Systemvariante kann der Nutzer über einen Button das Komponentenauswahlfenster (siehe Abbildung 3.30) öffnen und die Wärmepumpen, Kessel, Puffer- und TWW-Speicher beliebig konfigurieren. Beispielsweise können für kaskadierbare Wärmepumpengeräte auch Wärmepumpenkaskaden zusammengestellt werden.

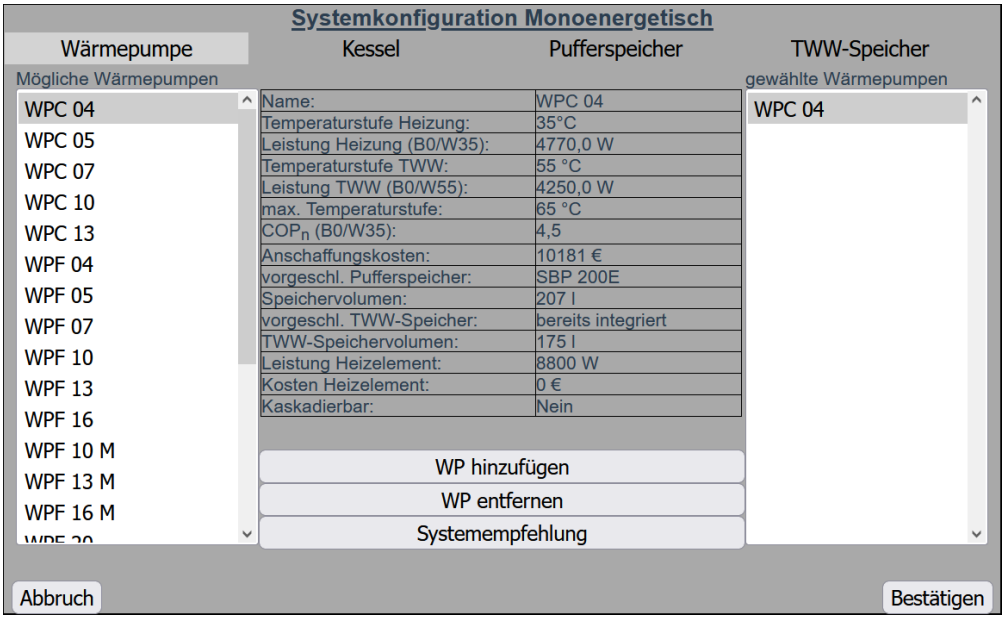


Abb. 3.30.: Screenshot des Komponentenauswahlfensters in GeoWPSys+Web

Im linken Bereich der Abbildung sind die verfügbaren Geräte oder Komponenten aufgelistet. Mit Klick auf eine Komponente werden dem Nutzer in der Mitte des Fensters weitere Informationen angezeigt, die teilweise mit anderen Eingaben verknüpft sind. Beispielsweise ändert sich die Nennleistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit ihrer Temperaturstufen für Heizen und TWW. Kann ein Wärmepumpengerät die vom Nutzer eingegebenen Vorlauftemperaturen nicht bedienen, werden dem Nutzer Warnungen durch die Einfärbung der entsprechenden Felder angezeigt. Zusätzlich werden Informationen wie z. B. der COP_N im Betriebspunkt B0/W35 und Investitionskosten dargestellt sowie Hinweise gegeben, ob die

Wärmepumpe beispielsweise kaskadierbar oder für den bivalenten Betrieb geeignet ist und ob im Wärmepumpengerät bereits ein TWW-Speicher integriert ist. Bezüglich der Puffer- und TWW-Speicher werden Herstellerempfehlungen angezeigt.

Über die Buttons *WP hinzufügen* und *WP entfernen* können Wärmepumpengeräte ausgewählt bzw. aus der Auswahl entfernt werden. Die Auswahl wird im rechten Bereich des Fensters angezeigt. Darüber hinaus kann die Komponentenauswahl im Auswahlfenster über den Button *Systemempfehlung* wieder auf den Zustand der Systemempfehlung zurückgesetzt werden.

Über die obere horizontale Leiste des Fensters kann zwischen den Komponentenarten gewechselt werden. Neben der Auswahl der Wärmepumpen können für den bivalent parallelen Betrieb und für das Vergleichssystem ein Gas-Brennwertkessel ausgewählt werden. Schließlich können für jede Systemvariante passende Puffer- und TWW-Speicher zusammengestellt werden. Bezüglich der Gas-Brennwertkessel und Speicher werden Informationen wie z. B. der Kesselwirkungsgrad, der Speichertyp, die Bereitschaftswärmeverluste und die Speichervolumina angezeigt.

3.5.2.7. Wärmepumpensimulation und Quellendimensionierung

Im nächsten Schritt des in Abbildung 3.23 dargestellten Sessionablaufs können einige Konfiguratorparameter über Wärmepumpensimulationen überprüft und spezifiziert werden. Die Simulationen berücksichtigen die in ModHPS implementierten Regelungsalgorithmen und Speicherbilanzen, sodass Parameter wie die JAZ oder der Deckungsanteil detailliert bestimmt werden können. Über den Button *Wärmepumpensimulation* in der Menüleiste der Hauptansicht (siehe Abbildung 3.24) öffnet sich das Wärmepumpensimulationsfenster (siehe Abbildung D.4). Im Simulationsfenster werden die für ModHPS relevanten Eingabeparameter aufgelistet und die Wärmepumpensystemvariante ausgewählt, die simuliert werden soll. Mit Klick auf den Button *Simulation starten* werden über die API die Eingabeparameter für ModHPS in die XML-Datei geschrieben, das Wärmepumpenmodell automatisiert angesteuert, die Simulationsergebnisse in die XML-Datei auf dem Server gespeichert und einzelne Parameter zur Überprüfung der konfiguratorinternen Berechnungen erneut eingelesen.

Wurden für die Bestimmung der Energiebedarfe keine Gebäudesimulationen angestoßen (vgl. Abbildung 3.23 Pfad A), müssen vor dem ersten Aufruf von ModHPS die für die Wärmepumpensimulation notwendigen stündlichen Jahreslastkurven durch das Starten der Gebäudeberechnungswerkzeuge erzeugt werden.

Die Kombination aus Konfiguration, unmittelbarer Ergebnisdarstellung und automatisiert angesteuerten sowie im Hintergrund laufenden Simulationen ermöglicht einen iterativen und praxistauglichen Dimensionierungsprozess zur Findung des optimalen Wärmepumpensystems. Bei der Dimensionierung des Gesamtsystems beeinflussen sich Parameter des Wärmepumpensystems und der geothermischen Quellenanlage gegenseitig (siehe Abschnitt 2.5.9). Die Erdwärmesondenlänge wird in GeoWPSys+Web im ersten Schritt vereinfacht für eine

Einzelsonde unter Berücksichtigung einer konstanten mittleren spezifischen Entzugsleistung der Erdwärmesonde und der Verdampferleistung der Wärmepumpe im Heizbetrieb berechnet (siehe Formel 2.8). Die Verdampferleistung wird aus der Differenz der Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme im Betriebspunkt der zugeordneten Temperaturstufe ermittelt. Für jede Betriebsweise ergeben sich somit die berechneten Sondenlängen (siehe Abbildung D.5). Zusätzlich kann der Nutzer die berechnete Sondenlänge über die Eingabefelder der ausgewählten Sondenlängen anpassen. Zukünftig soll aus GeoWPSys+Web eine bidirektional gekoppelte Simulation aus ModHPS und einem analytischen Untergrundmodell mit schnellen Rechenzeiten angestoßen werden können, um die Erdwärmesondenlänge unter Berücksichtigung des Wärmepumpeneinflusses zu simulieren.

3.5.2.8. Projekte speichern

Schließlich können die Eingaben und Ergebnisse des Konfigurators in die Projekt-XML-Datei über Buttons in der Menüleiste gespeichert und exportiert werden.

3.5.3. Erweiterte Funktionalitäten von GeoWPSys+

GeoWPSys+ ist in der Programmiersprache C++ und mittels der Bibliothek *Qt* als ausführbares Desktopprogramm für das Betriebssystem Windows implementiert. Anders als beim Web-Frontend, wird beim Import und Export der Projekt-XML-Datei die lokale Ordnerstruktur auf dem PC des Nutzers verwendet. Weiterführende Details zum Desktopprogramm sind in Böth [2021] beschrieben. GeoWPSys+ enthält folgende Funktionalitäten, die zum derzeitigen Stand in GeoWPSys+Web und der optimierten Nutzerführung nicht integriert sind.

- Systemvergleiche mit der teilparallelen und alternativen Wärmepumpenbetriebsweise
- Abbildung von Erdwärmekollektoren als zusätzliches geothermisches Quellensystem
- Automatisierte Puffer- und TWW-Speicherdimensionierung
- Systemvergleiche auf Quartiersebene:
  - Abbildung eines kalten Nahwärmenetzes mit dezentralen Wärmepumpen
  - Abbildung dezentraler Wärmepumpen ohne Wärmenetz
  - Abbildung eines Wärmenetzes mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW)
- Zusätzliche visuelle Elemente und Berechnungen

3.5.3.1. Alternative und teilparallele Wärmepumpenbetriebsweise

Zusätzlich zur monovalenten, monoenergetischen und bivalent-parallelen Betriebsweise sind die bivalent-alternative und bivalent-teilparallele Betriebsweisen samt Abhängigkeiten neuer Eingabeparameter integriert. Über die Auswahl der visualisierten Systemvarianten können bis zu sechs Varianten gegenübergestellt werden (siehe Abbildung 3.31).

3.5.3.2. Erweiterte Quellendimensionierung

In GeoWPSys+ können neben Erdwärmesonden zusätzlich Erdwärmekollektoren über ein Auswahlfeld und eine flächenspezifische Entzugsleistung dimensioniert werden. Bei der Dimensionierung von Wärmepumpensystemen mit Erdwärmekollektoren wird in der SCOP-Berechnung eine minimale Wärmequellenaustrittstemperatur von 0 °C angesetzt (vgl. [VDI 4650, 2019]), sodass der SCOP geringer ausfällt als bei Erdwärmesondenanlagen mit einer Wärmequellenaustrittstemperatur von 2 °C.

3.5.3.3. Automatisierte Speicherdimensionierung

Zusätzlich zum Systemvorschlag der Wärmepumpe und einem zweiten Wärmeerzeuger werden in GeoWPSys+ Vorschläge für die Dimensionierung von Puffer- und TWW-Speichern gegeben. Dazu werden die benötigten Mindestvolumina berechnet und ein Set aus Speichern zugeordnet, das die Mindestvolumina erreicht. Kombispeicher in Form von Tank-in-Tank-Systemen sind für Wärmepumpen weniger geeignet [VDI 4645, 2018] und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Vertiefende Grundlagen zur Speicherdimensionierung sind in Löhmer [2020] beschrieben.

Neben der zeitlichen Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeerzeugung können thermische Speicher weitere Funktionen erfüllen. Sie können u. a. zur Vermeidung von zu häufigem Takten, zur Gewährleistung einer Mindestlaufzeit der Wärmepumpe, zur Überbrückung von Sperrzeiten oder zur Bereitstellung eines Mindestvolumenstroms an Heizungswasser genutzt werden [VDI 4645, 2018].

In GeoWPSys+ werden Pufferspeichervolumina nach Formel 3.14 berechnet.

$$V_{\text{Puffer}} = \frac{\dot{Q} \cdot t}{c_w \cdot \varrho_w \cdot \Delta T} \tag{3.14}$$

Das Pufferspeichervolumen (V_{Puffer}) wird von der Wärmeleistung ($\dot{Q}$), der Bezugszeit (t), der Temperaturdifferenz (ΔT) sowie der Dichte (ϱ_w) und spezifischen Wärmekapazität (c_w) von Wasser beeinflusst. Die Stoffeigenschaften werden als konstant für eine Temperatur von 20 °C angesetzt. Wird der Pufferspeicher zur Laufzeitoptimierung eingesetzt, entspricht t der Mindestlaufzeit und $\dot{Q}$ der Nennleistung der Wärmepumpe. In diesen Fällen entspricht

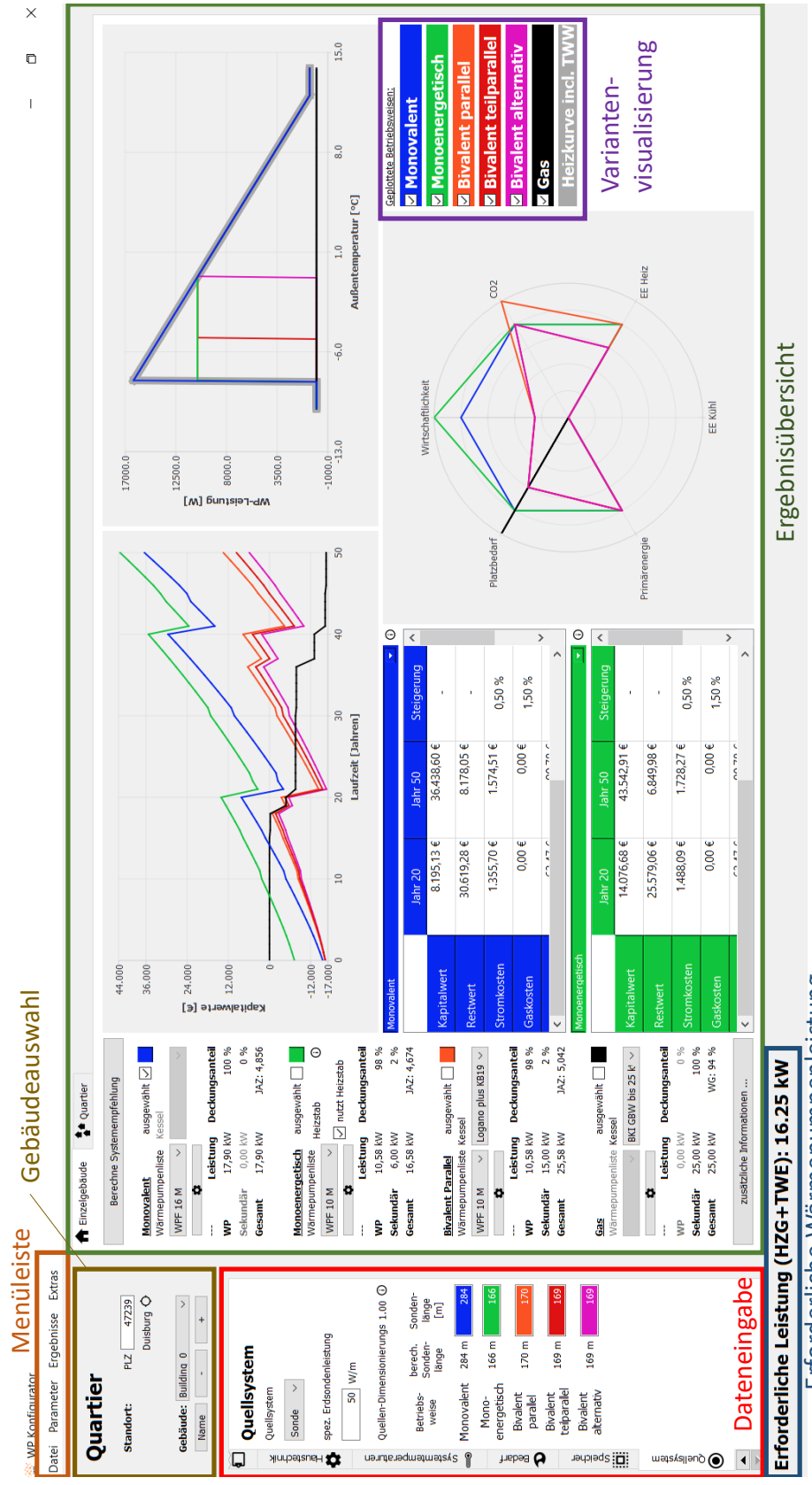


Abb. 3.31.: Hauptansicht von GeoWPSys+

ΔT der Temperaturdifferenz am Erzeugerkreis. Letzterer verortet sich zwischen der Wärmepumpe und dem Pufferspeicher. Dient der Pufferspeicher zur Überbrückung von Sperrzeiten, entspricht t der Sperrdauer am Stück, $\dot{Q}$ der Normheizlast des Gebäudes und ΔT der Temperaturdifferenz am Verbraucherkreis zwischen Pufferspeicher und Heizungsverteilsystem.

In Abbildung 3.32 sind Lösungsbereiche von Formel 3.14, in Abhängigkeit von der Funktion des Speichers, verschiedenen Ansätzen zur Pufferspeicherdimensionierung aus der Literatur gegenübergestellt.

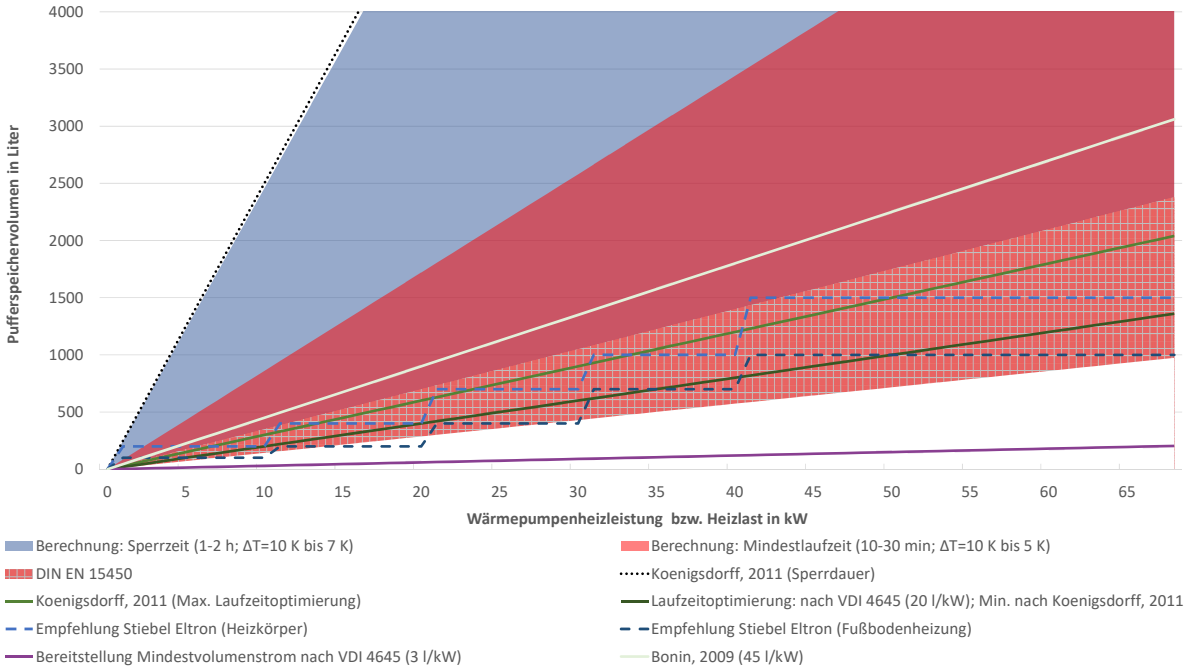


Abb. 3.32.: Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Dimensionierung von Pufferspeichern in Anlehnung an [Löhmer, 2020]

Zur Bereitstellung des Mindestvolumenstroms für einen störungsfreien Wärmepumpenbetrieb werden nach VDI 4645 [2018] drei Liter Pufferspeicherinhalt pro Kilowatt Wärmepumpennennleistung benötigt. Wird der Speicher zur Laufzeitoptimierung oder Sperrzeitenüberbrückung eingesetzt, ergeben sich größere Pufferspeichervolumina. Nach DIN EN 15450 [2007] kann eine Richtwertbandbreite zur Pufferspeicherdimensionierung zwischen zwölf und 35 Liter pro Kilowatt der maximalen Wärmepumpenleistung herangezogen werden. Innerhalb dieses Bereichs liegen auch die Empfehlungen für die Laufzeitoptimierung nach VDI 4645 [2018], Viessmann [2011] und Koenigsdorff [2011] sowie die gerätespezifischen Pufferspeichervorschläge nach ELTRON [2017]. Letztere werden in Vorschläge für Heizkörper und Fußbodenheizung unterteilt.

Der nach Formel 3.14 berechnete Bereich für die Laufzeitoptimierung spannt einen Bereich zwischen 14,33 l/kW und knapp 86 l/kW auf. Als Grenzrandbedingungen wurden eine Mindestlaufzeit von zehn Minuten und eine Erzeugerkreistemperaturdifferenz von zehn Kelvin

bzw. eine Mindestlaufzeit von 30 Minuten und eine Temperaturdifferenz von fünf Kelvin festgelegt. Innerhalb dieses Bereichs liegt auch ein Beispielwert nach Striebel [2009] mit einem ΔT von zehn Kelvin und einer Mindestlaufzeit von 30 Minuten.

Zur Überbrückung von Sperrzeiten spannt sich nach Formel 3.14 ein Bereich von 86 l/kW bis knapp 246 l/kW auf. Dabei wurden eine bzw. zwei Stunden Sperrdauer am Stück sowie ein ΔT von zehn Kelvin für Heizkörper bzw. sieben Kelvin für Flächenheizsysteme angesetzt. Aufgrund von maximal drei Sperrungen am Tag für höchstens zwei Stunden am Stück [ELTRON, 2019], einer genauso langen sperrfreien Zeit zwischen den einzelnen Sperrzeiten [Buderus, 2022] und einer möglichen Speicherbeladung in den sperrfreien Zeiten wird für die Pufferspeicherdimensionierung ein Maximum von zwei Stunden angesetzt. In Koenigsdorff [2011] wird ein Wert von 250 l/kW zur Überbrückung von Sperrzeiten empfohlen.

Die Pufferspeichervolumina jeder Wärmepumpensystemvariante werden für die Fälle Laufzeitoptimierung ($V_{\text{Puffer,Laufzeit}}$) und Sperrzeitüberbrückung ($V_{\text{Puffer,Sperr}}$) berechnet. Zusätzlich sind in $V_{\text{Puffer,Sperr}}$ Verteil- und Übergabeverluste des Heizungssystems innerhalb der angesetzten Sperrdauer über Nutzereingaben berücksichtigt. Das Maximum aus beiden Volumina bestimmt das Mindestspeichervolumen ($V_{\text{Puffer,min}}$) der Systemvariante (vgl. [Löhmer, 2020]):

$$V_{\text{Puffer,min}} = \max(V_{\text{Puffer,Sperr}}, V_{\text{Puffer,Laufzeit}}) \tag{3.15}$$

Bei den bivalenten Wärmepumpensystemen kann die Sperrdauer i. d. R. durch den zweiten Wärmeerzeuger überbrückt werden [VDI 4645, 2018], sodass Sperrzeiten bei der Speicherdimensionierung nicht berücksichtigt werden müssen. Über ein Auswahlfeld kann der Nutzer festlegen, ob der zweite Wärmeerzeuger die Deckung des Heizwärmebedarfs während der Sperrzeiten übernimmt. Bei der Sperrzeitüberbrückung durch den zweiten Wärmeerzeuger und für das Gasbrennwertsystem wird das Speichervolumen der Laufzeitoptimierung angesetzt. Die Dauer und das Auftreten der Sperrzeiten über den Tag können vom Nutzer über ein separates Fenster spezifiziert werden (siehe Abbildung E.1).

Neben der Berücksichtigung von Sperrzeiten und Mindestlaufzeiten der Wärmepumpe wird für Systeme mit Fußbodenheizung ein fiktives Speichervolumen ($V_{\text{Sp,FBH}}$) anhand der nutzbaren Wärmespeicherkapazität der Fußbodenheizung berechnet und von dem berechneten Mindestvolumen des Pufferspeichers abgezogen. Das fiktive Fußbodenheizungsvolumen wird über den Vergleich der Wärmemenge des Estrichs mit der Wärmemenge eines Wasserspeichers in Anlehnung an Löhmer [2020] nach Formel 3.16 berechnet:

$$V_{\text{Sp,FBH}} = \frac{c_{\text{Estrich}} \cdot \varrho_{\text{Estrich}} \cdot A_{\text{FBH}} \cdot d_{\text{Estrich}} \cdot \Delta T_{\text{Estrich}}}{c_w \cdot \varrho_w \cdot \Delta T_{\text{VK}}} \tag{3.16}$$

Jede Variable und Stoffkonstante der Gleichung kann nutzerseitig geändert werden. Das vorgeschlagene Pufferspeichervolumen ($V_{\text{Puffer,Vorschlag}}$) entspricht schließlich:

$$V_{\text{Puffer,Vorschlag}} = \max(V_{\text{Puffer,Sperr}} - V_{\text{Sp,FBH}}, V_{\text{Puffer,Laufzeit}} - V_{\text{Sp,FBH}}) \tag{3.17}$$

Ist das vorgeschlagene Pufferspeichervolumen kleiner oder gleich Null, wird eine Systemempfehlung ohne Pufferspeicher zusammengestellt.

Das Mindestvolumen der TWW-Speicher $V_{\text{Sp,TWW,min}}$ wird in Anlehnung an VDI 4645 [2018] nach Formel 3.18 berechnet und berücksichtigt die zu speichernde Energiemenge, TWW-Verteilverluste und Durchmischungsverluste:

$$V_{\text{Sp,TWW,min}} = \frac{Q_{\text{TWW}} + Q_V}{c_w \cdot \varrho_w \cdot (T_{\text{TWW,Nenn}} - T_{\text{KW}})} \cdot 1{,}15 \tag{3.18}$$

Für die Durchmischungsverluste innerhalb des TWW-Speichers wird ein Aufschlag von 15 Prozent angesetzt [VDI 4645, 2018]. Die TWW-Nenntemperatur ($T_{\text{TWW,Nenn}}$), die Wärmemenge für die TWW-Verteilverluste (Q_V) und die Kaltwassertemperatur (T_{KW}) werden vom Nutzer eingegeben. Für Letztere wird ein Standardwert von 10 °C vorgeschlagen.

Bezüglich der zu speichernden Energiemenge (Q_{TWW}) wird zwischen drei Berechnungsvarianten unterschieden:

- Spitzenlast
- Sperrzeit
- Tagesfaktor

Bei der ersten Variante wird Q_{TWW} durch die Multiplikation der Tagesspitzenlast des TWW-Bedarfs mit dessen Zapfdauer bestimmt. Die Spitzenlast ergibt sich aus einem vom Nutzer konfigurierbaren TWW-Tageszapfprofil (siehe Abbildung E.1).

Bei der Dimensionierung nach den Sperrzeiten werden die Energiemengen für die TWE aufsummiert, die während der angesetzten Sperrzeiten über den Tag anfallen.

Bei der dritten Variante wird der TWW-Speicher anhand eines vom Nutzer festgelegten prozentualen Anteils des TWW-Tagesbedarfs dimensioniert. Als Standardwert werden für Wohngebäude 45 % in Anlehnung an die TWW-Bedarfsverteilung über den Tag angesetzt [DIN EN 15450, 2007].

3.5.3.4. Systemvergleiche auf Quartiersebene

Neben der Einzelgebäudebilanz beinhaltet GeoWPSys+ zusätzlich eine vereinfachte und prototypisch umgesetzte Quartiersbilanz, in der folgende Systemvarianten miteinander verglichen werden:

a) Kaltes Nahwärmenetz mit einem zentralen Erdwärmesondenfeld und dezentralen Wärmepumpen

b) Einzelgebäudeversorgung mit dezentralen Erdwärmesonden und Wärmepumpen

c) Wärmenetz in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW)

Wärmenetze mit niedrigen Temperaturniveaus haben das Potenzial, dezentral verteilte erneuerbare Wärmequellen zu bündeln und die Wärme an die Verbraucher verlustarm zu verteilen. Wärmenetze sind insbesondere im städtischen Bereich sinnvoll, wo hohe Energiebedarfsdichten auftreten und dezentrale Wärmepumpenlösungen aufgrund von Platzmangel schwer umsetzbar sind.

Kalte Nahwärmenetze werden im oberflächennahen Erdreich verlegt und stellen eine Sonderform von Wärmenetzen dar, da das Netztemperaturniveau im Bereich des umgebenden Erdreichs liegt. Dadurch können die Wärmeverluste des Netzes minimiert und i. d. R. auf eine Dämmung der Rohrleitungen verzichtet werden. Liegt das Temperaturniveau des Erdreichs in der Heizperiode oberhalb der Netztemperatur, kann das Netz Energie aus dem Untergrund beziehen und somit die Größe der geothermischen Quellensysteme reduzieren. Zusätzlich können kalte Nahwärmenetze auch zur Gebäudekühlung eingesetzt werden.

Aufgrund der vereinfachten und prototypischen Umsetzung wird im Folgenden nur verkürzt auf die Quartiersbilanzen eingegangen. In Abbildung 3.33 ist die Quartiersansicht von GeoWPSys+ dargestellt.

Aus der Summe der Einzelgebäude ergibt sich das betrachtete Quartier. Die Einzelgebäude und die Betriebsweisen der zugeordneten Wärmepumpen können über Auswahllisten spezifiziert werden. Mit der Auswahl eines Gebäudes schaltet GeoWPSys+ wieder in die Einzelgebäudeansicht (vgl. Abbildung 3.31), sodass der Nutzer die Systemkonfiguration und Eingabeparameter jedes Gebäudes anpassen kann.

Die Wärmenetze werden in GeoWPSys+ u. a. mittels längenspezifischer Investitionskosten und Wärmeverlusten bzw. Wärmegewinnen bilanziert. Das Erdwärmesondenfeld der Variante a) wird vereinfacht als eine einzelne Bohrung mit der errechneten Gesamtlänge approximiert, die aus der Summe der benötigten Einzelsondenbohrmeter inklusive eines Gleichzeitigkeitsfaktors und Wärmeverlusten bzw. -gewinnen resultiert. Der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt die zeitliche Diskrepanz der Wärmeleistungsspitzen der einzelnen Abnehmer. Dadurch wird die erforderliche Nennleistung des BHKW und die Gesamtsondenlänge des zentralen Erdwärmesondenfeldes reduziert.

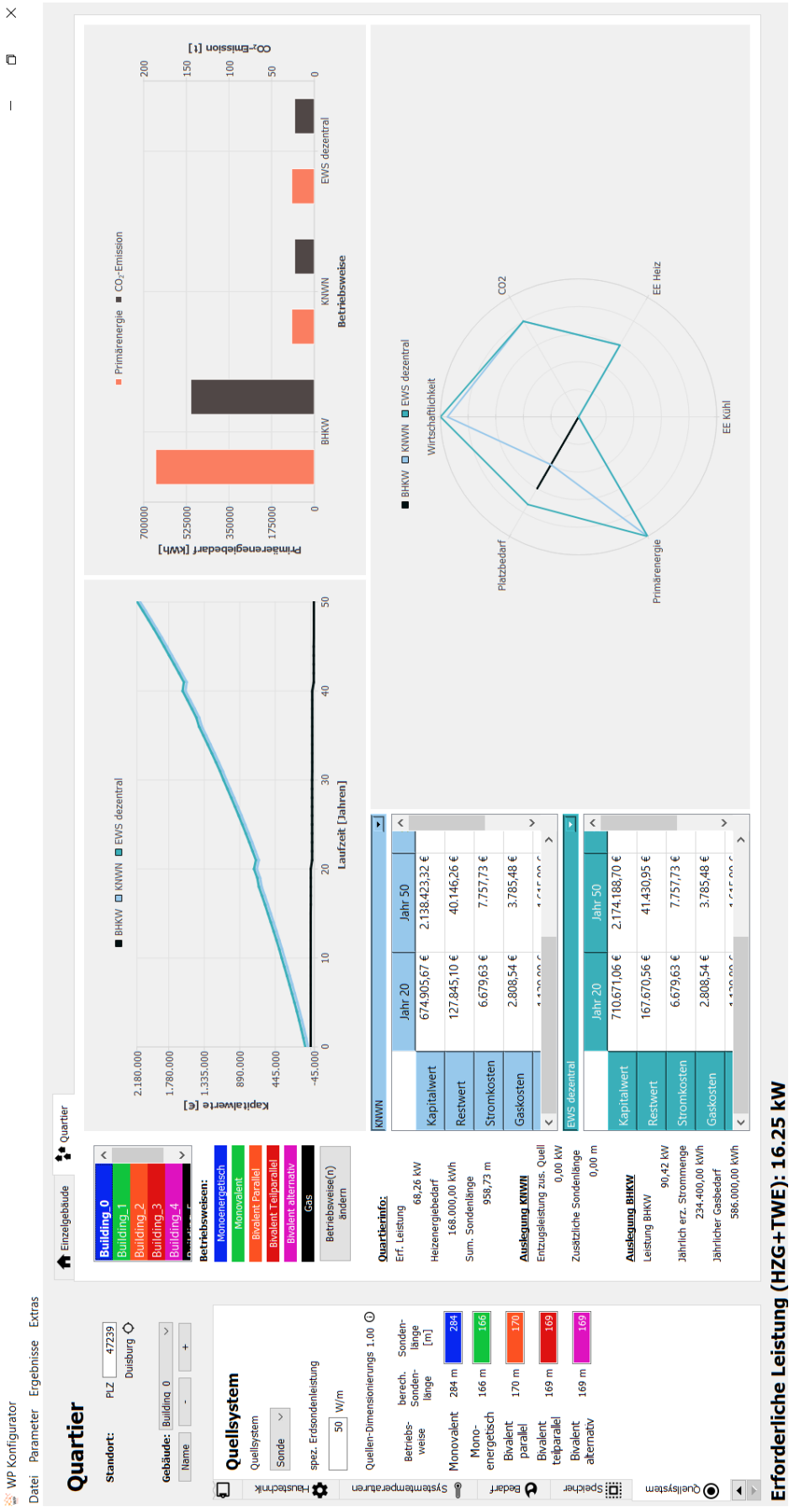


Abb. 3.33.: Quartiersansicht von GeoWPSys+

Ergänzend zu GeoWPSys+Web wird eine Übersicht der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten THG-Emissionen und Primärenergie der untersuchten Systemvarianten in Form eines Balkendiagramms visualisiert. Zur Bilanzierung des BHKW werden die verursachten Emissionen und die Primärenergie auf die Energieträger Strom und Wärme aufgeteilt. Gängige Allokationsmethoden sind die Internationale Energie Agentur(IEA)-Methode, die Wirkungsgradmethode, die Finnische Methode und Gutschriften für Wärme oder Strom [Mauch et al., 2010]. Eine Variante der Stromgutschrift ist die Verdrängungsmixmethode, bei der der BHKW-Strom mit Erzeugungsstromprofilen anderer Kraftwerke verglichen wird, die aufgrund der zusätzlichen BHKW-Stromproduktion aus dem Strommarkt, gemäß des Merit-Order-Prinzips, verdrängt werden würden [Mauch et al., 2010]. Dabei wird für die Bilanzierung der Primärenergie der Verdrängungsstrommix mit dem Primärenergiefaktor von 2,8 angesetzt, anstatt 1,8 für den nicht erneuerbaren Anteil des deutschen Strommixes. Diese Bevorteilung des Stroms aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) beeinflusst die Primärenergiebilanz maßgebend zu Gunsten des BHKW [Mauch et al., 2010]. Zudem bestehen systematische Schwächen dieser Methoden darin, dass negative THG-Emissionen möglich sind [Mauch et al., 2010] und die Methoden sensitiv auf das Referenzsystem sowie den Strom- und Wärmewirkungsgrad der KWK-Anlage reagieren [Hertle et al., 2014].

Aufgrund der Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf den Wärmesektor und die oberflächennahe Geothermie wird nur der zum Betrieb der Wärmepumpe und einer zentralen Netzumwälzpumpe benötigte Strom in die Strombilanz inkludiert. Das BHKW wird vereinfacht abgebildet und es werden keine Vergleiche mit fossilen Referenzkraftwerken angesetzt. Dadurch sind die zuvor genannten Methoden nicht ohne Einschränkungen anwendbar. In Form einer konservativen Bilanzierung wird vereinfacht angenommen, dass der im BHKW erzeugte Strom vollständig ins Stromnetz eingespeist und dementsprechend ökonomisch vergütet wird. Dies verbessert die wirtschaftliche Bilanz der BHKW-Variante. Die Primärenergie und die CO_2-Äquivalente werden anhand der Gasbezugsmenge des BHKW vollständig angesetzt.

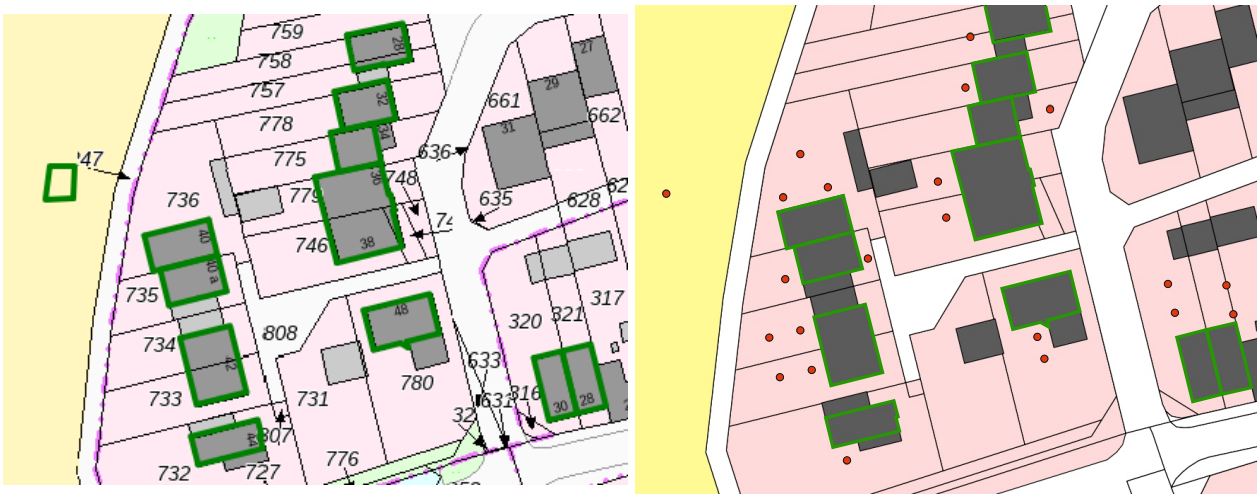
3.5.3.5. Zusätzliche visuelle Elemente und Berechnungen

Darüber hinaus enthält GeoWPSys+ zusätzliche visuelle Elemente und Berechnungen wie beispielsweise eine Übersicht über die prozentuale Verteilung der Investitionskosten und Förderungen oder eine automatisierte Bestimmung der Normaußentemperatur in Abhängigkeit von der Postleitzahl des Standortes.

4. Demonstration

In diesem Kapitel wird mit PlanGeoWP der simulationsbasierte Planungsprozess anhand des Fallbeispiels aus van Treeck et al. [2020] demonstriert. Der Fokus liegt dabei auf planerischen Abhängigkeiten und deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und THG-Emissionen, die durch den Systemkonfigurator und die angestoßenen Wärmepumpensimulationen analysiert werden können.

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, kann sich der Nutzer geothermische Standortinformationen im Geoportal anzeigen lassen. Ist der Standort grundlegend für oberflächennahe geothermische Systeme geeignet, werden die Gebäude ausgewählt und automatisiert vorparametriert (vgl. [Weck-Ponten et al., 2018a]) sowie Erdwärmesonden GIS-basiert und georeferenziert platziert. In Abbildung 4.1 ist das betrachtete Quartier und die im Geoportal platzierten Erdwärmesonden des Fallbeispiels dargestellt.



(a) [van Treeck et al., 2020]

(b) [van Treeck et al., 2020]

Abb. 4.1.: Gebäudeauswahl (a) und Sondenpositionen (b) im Beispielquartier

Das Fallbeispiel besteht aus einem Quartiersteil mit elf Bestandsgebäuden und einem neu platzierten Gebäude (oben links in Abbildung 4.1a). Die Gebäudesimulationen wurden bereits über das Geoportal angestoßen und müssen im Folgenden nicht über den Systemkonfigurator ausgeführt werden. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Gebäudesimulationen und der analytischen Untergrundberechnung samt der berechneten Erdwärmesondenlängen und Untergrundtemperaturprofile sowie weitere Informationen zum Fallbeispiel sind in van Treeck et al. [2020] beschrieben.

Im Anschluss an die Nutzerinteraktionen im Geoportal werden Gebäude- und Wärmepumpeninformationen sowie die für die angebundenen Simulationen notwendigen Informationen in die Projekt-XML-Datei gespeichert und vom Nutzer heruntergeladen. Die Gebäude-, Wärmepumpen- und Simulationsparameter des Fallbeispiels sind im Abschnitt F.1 als XML-Datei aufgelistet. Im nächsten Schritt werden die XML-Datei in GeoWPSys+Web importiert und geparst sowie die benötigten Informationen dargestellt.

Im Fallbeispiel aus van Treeck et al. [2020] wurden die Wärmepumpen vereinfacht nach der Summe der maximalen Lasten für die Gebäudebeheizung und TWE aus den Gebäudesimulationsergebnissen dimensioniert, ohne die Berücksichtigung von Sperrzeiten oder verschiedenen Wärmepumpenbetriebsweisen. Die Randbedingungen der Dimensionierung sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die Wärmepumpen *HP03*, *HP05* und *HP09* wurden zu Testzwecken bezüglich der maximalen Gebäudelasten unterdimensioniert und *HP11* überdimensioniert. Die Wärmepumpen *HP02*, *HP09* und *HP10* stellen kein TWW bereit. In diesen Fällen werden dezentrale TWE angenommen. Darüber hinaus arbeiten die Wärmepumpen *HP10* und *HP12* auf höheren Temperaturniveaus als 35 °C.

Tab. 4.1.: Randbedingungen der Wärmepumpendimensionierung des Fallbeispiels aus van Treeck et al. [2020]

Gebäude-ID	$\dot{Q}_{\mathrm{max,Geb,H+TWW}}$ in kW	WP-ID	WP-Gerät	$\dot{Q}_{\mathrm{Nenn}}$ in kW	$T_{\mathrm{VL,H}}$ in °C	$T_{\mathrm{VL,TWW}}$ in °C
660431	4,9	HP01	WPC 05 / WPC 05 cool	5,82	35	55
656408	10,0	HP02	WPF 10 M	10,02	35	–
655518	10,3	HP03	WPF 10 M	10,02	35	55
000011	3,9	HP04	WPC 04 / WPC 04 cool	4,77	35	55
655122	10,5	HP05	WPF 10 M	10,02	35	55
655131	9,9	HP06	WPF 10 M	10,02	35	55
657864	4,9	HP07	WPC 05 / WPC 05 cool	5,82	35	55
661433	12,6	HP08	WPF 13 M	12,98	35	55
658081	5,9	HP09	WPF 5 / WPF 5 cool	5,82	35	–
656420	11,9	HP10	WPF 13 M	11,99	55	–
658285	6,9	HP11	WPF 10 M	10,02	35	55
660687	19,9	HP12	WPF 27 HT	23,96	65	55

$\dot{Q}_{\mathrm{max,Geb,H+TWW}}$ = Summe der maximalen Lasten für die Gebäudebeheizung und TWE; $\dot{Q}_{\mathrm{Nenn}}$ = Wärmepumpennennleistung im Heizungsauslegungspunkt; $T_{\mathrm{VL,H}}$ = Heizungsvorlauftemperatur; $T_{\mathrm{VL,TWW}}$ = TWW-Vorlauftemperatur; WP = Wärmepumpe

Für die Dimensionierung in GeoWPSys+Web werden die Normheizlasten der Gebäude benötigt. Die Gebäude *655518*, *655122* und *660687* wurden auf der Grundlage ihrer Normheizlast mit SCoTED simuliert (siehe [van Treeck et al., 2020]). Die Normheizlasten der restlichen Gebäude ($\dot{Q}_{\mathrm{HL}}$) werden anhand der höchsten Last der stundengenauen Gebäudelastkurven ($\dot{Q}_{\mathrm{max}}$), der Normaußentemperatur (T_{NA}), der in den Simulationen angesetzten Heizgrenztemperatur (T_{HG}) von 15 °C und der minimalen Temperatur des Außentemperaturverlaufs ($T_{\mathrm{TRY,min}}$) des Standorts nach Formel 4.1 abgeschätzt.

$$\dot{Q}_{\mathrm{HL}} = \frac{T_{\mathrm{HG}} - T_{\mathrm{NA}}}{T_{\mathrm{HG}} - T_{\mathrm{TRY,min}}} \cdot \dot{Q}_{\mathrm{max}} \tag{4.1}$$

Die berechneten Normheizlasten, die von GeoWPSys+Web vorgeschlagenen Wärmepumpengeräte für die monovalente Betriebsweise sowie weitere für die Konfiguration relevanten Randbedingungen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tab. 4.2.: Randbedingungen der Wärmepumpensystemempfehlung für die monovalenten Betriebsweisen in GeoWPSys+Web (ohne Sperrzeiten oder sonstigen Wärmebedarfen)

WP-ID	$\dot{Q}_{\mathrm{HL}}$ in kW	E_{TWW} in kWh	E_{H} in kWh	$\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$ in kW	WPE	$\dot{Q}_{\mathrm{Nenn}}$ in kW	$T_{\mathrm{VL,H}}$ in °C	$T_{\mathrm{VL,TWW}}$ in °C
HP01	4,94	1.800	8.200	5,15	WPC 05	5,82	35	55
HP02	12,047	0	22.026	12,047	WPF 13 M	12,98	35	–
HP03	10	4.173	16.601	10,48	WPF 13 M	12,98	35	55
HP04	3,951	1.440	6.560	4,12	WPC 04	4,77	35	55
HP05	10	4.530	15.372	10,52	WPF 13 M	12,98	35	55
HP06	9,157	4.324	20.300	9,65	WPF 10 M	10,02	35	55
HP07	4,94	1.800	8.200	5,15	WPC 05	5,82	35	55
HP08	12,283	4.709	30.968	12,82	WPF 13 M	12,98	35	55
HP09	5,927	0	9.840	5,927	WPC 07	7,5	35	–
HP10	11,604	0	25.339	11,604	WPC 13	11,99	55	–
HP11	6,915	2.520	11.480	7,2	WPC 7	7,5	35	55
HP12	20	6.825	33.203	20,78	WPF 27 HT	23,96	65	55

E_{H} = Jahresenergiebedarf für Heizung; E_{TWW} = Jahresenergiebedarf für TWW; $\dot{Q}_{\mathrm{HL}}$ = Normheizlast; $\dot{Q}_{\mathrm{Nenn}}$ = Wärmepumpennennleistung im Heizungsauslegungspunkt; $\dot{Q}_{\mathrm{WP}}$ = erforderliche Wärmepumpenleistung nach VDI 4645; $T_{\mathrm{VL,H}}$ = Heizungsvorlauftemperatur; $T_{\mathrm{VL,TWW}}$ = TWW-Vorlauftemperatur; WP = Wärmepumpe; WPE = Wärmepumpensystemempfehlung aus GeoWPSys+Web

Aus der Dimensionierung anhand der Normheizlast und dem Tagesenergiebedarf für TWW nach VDI 4645 [2018] ergeben sich größere erforderliche Wärmepumpenleistungen als die in van Treeck et al. [2020] angesetzten Nennleistungen, sodass beispielsweise für die Wärmepumpe *HP02* ein anderes Wärmepumpengerät vorgeschlagen wird. Darüber hinaus konnten die unter- bzw. überdimensionierten Systeme mithilfe von GeoWPSys+Web identifiziert und passender dimensioniert werden. Schließlich werden den Wärmepumpen die vom Hersteller empfohlenen Puffer- und TWW-Speicher zugeordnet und die Varianten der anderen Wärmepumpenbetriebsweisen und des Vergleichssystems automatisiert vorkonfiguriert.

In Tabelle 4.3 sind die Systemvarianten jedes Gebäudes aufgeführt, die nach GeoWPSys+Web die größte Wirtschaftlichkeit und geringsten THG-Emissionen aufweisen. Die wirtschaftlichsten Varianten sind für die ausgewählten Gebäude meist die monoenergetisch betriebenen Wärmepumpensysteme. Die Systeme mit den geringsten THG-Emissionen sind i. d. R. die monovalenten Varianten, da bei ihnen kein Heizstab eingesetzt wird. Ist der Heizstababanteil gering, wird dadurch der SCOP nur geringfügig verringert, sodass in manchen Fällen auch die monoenergetischen Systemvarianten die geringsten THG-Emissionen aufweisen.

Bivalent-parallele Wärmepumpensysteme können erst bei höheren Leistungsklassen wirtschaftlicher sein als die monovalenten bzw. monoenergetischen Systeme (vgl. [Weck-Ponten et al., 2021b]). *HP12* stellt aufgrund der hohen Heizungsvorlauftemperatur einen Sonderfall dar. Hier muss eine Hochtemperaturwärmepumpe eingesetzt werden, sodass bei diesem Gebäude für den monovalenten, monoenergetischen und bivalent parallelen Fall das gleiche Gerät vorgeschlagen wird. Die Wärmepumpe *WPF 27 HT* ist für alle Wärmepumpenbetriebsweisen überdimensioniert, sodass die monovalente Variante sowohl das wirtschaftlichste als auch ökologischste System ist.

Tab. 4.3.: Wirtschaftlichste und ökologischste Systemvarianten jedes Gebäudes des Fallbeispiels

Gebäude-ID	WP-ID	WSV	AM in a	K in €	OSV	CO_2e in t
660431	HP01	ME	3	27.510	MV	15,3
656408	HP02	ME	4	54.700	MV	32,8
655518	HP03	ME	3	53.360	ME	33,5
000011	HP04	MV/ME	3	21.274	MV/ME	12,5
655122	HP05	ME	3	50.644	ME	32,5
655131	HP06	ME	3	65.115	ME	38,2
657864	HP07	ME	3	27.510	MV	15,3
661433	HP08	ME	2	90.591	MV	56,3
658081	HP09	ME	3	27.739	MV	13,6
656420	HP10	ME	3	60.121	MV	43,6
658285	HP11	ME	2	37.364	MV	21,2
660687	HP12	MV	6	69.817	MV	82,0

AM = Amortisation der wirtschaftlichsten Variante; CO_2e = summierte Menge an CO_2-Äquivalenten der ökologischsten Variante über 20 Jahre; K = Kapitalwertdifferenz der wirtschaftlichsten Variante im Vergleich zum Gas-Brennwertkessel nach 20 Jahren; ME = monoenergetisch; MV = monovalent; OSV = ökologischste Systemvariante (geringster THG-Ausstoß; CO_2-Äquivalente über 20 Jahre summiert); WP = Wärmepumpe; WSV = wirtschaftlichste Systemvariante

Nachfolgend werden Systemvariationen der Wärmepumpe *HP05* genauer analysiert, um die Potenziale und Möglichkeiten von GeoWPSys+Web aufzuzeigen. In Tabelle 4.4 und Abbildung 4.2 sind die Unterschiede des Wechsels von der monovalenten zur monoenergetischen Betriebsweise gegenübergestellt.

Durch die Umstellung von der Wärmepumpe *WPF 13 M* auf die Wärmepumpe *WPC 07* sinken die Nennleistung der Wärmepumpe, die berechnete Erdwärmesondenlänge und die Investitionskosten der Erdwärmesonden um ca. 42 %. Die Investitionskosten des Gesamtsystems werden um elf Prozent reduziert. Die angesetzten Gesamtinvestitionskosten ohne Berücksichtigung von Förderungen sind in Tabelle F.1 aufgelistet. Der SCOP bleibt aufgrund leicht unterschiedlicher COP_N der Wärmepumpengeräte und einem kleinen Heizstabanteil annähernd gleich.

Im Folgenden werden die Unterschiede der Differenzkapitalwerte der beiden Wärmepumpen-

systeme analysiert. Die Differenzkapitalwerte ergeben sich durch die Differenz der Kapitalwerte der betrachteten Wärmepumpensystemkonstellation im Vergleich zur Gasbrennwerttherme (siehe Abschnitt 3.5.2.5). Der Differenzkapitalwert im zwanzigsten Betrachtungsjahr erhöht sich durch die geänderte Konfiguration um 16 Prozent. Die Kapitalwerte sind abhängig von den Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse. In dem hier betrachteten Fallbeispiel wurden ein Kalkulationszinzsatz von fünf Prozent, ein Strompreis von 35 ct/kWh, ein Gaspreis von 21 ct/kWh sowie Strom- und Gaspreissteigerungen von zwei und drei Prozent angesetzt. Weitere Randbedingungen und die Ergebnisdiagramme von GeoWPSys+Web sind in Abschnitt F in den Abbildungen F.1 bis F.7 aufgelistet.

Tab. 4.4.: Konfigurationsunterschiede des Wechsels von der monovalenten zur monoenergetischen Betriebsweise für die Wärmepumpe *HP05*

	Monovalent	Monoenergetisch			
	WPF 13 M	WPC 07	WPF 07	WPC 05	WPC 04
$P_{\text{Nenn,WP}}$:	12,98 kW	7,5 kW	7,5 kW	5,82 kW	4,77 kW
$P_{\text{Nenn,HS}}$:	–	8,8 kW	8,8 kW	8,8 kW	8,8 kW
I_{WP}:	9.452 €	11.346 €	10.590 €	10.520 €	10.181 €
Pufferspeicher:	SBP 200 E	SBP 200 E	SBP 200 E	SBP 200 E	SBP 200 E
V_{Puffer}:	207 *l*	207 *l*	207 *l*	207 *l*	207 *l*
I_{Puffer}:	917 €	917 €	917 €	917 €	917 €
TWW-Speicher:	SBB 400-1 Plus	(IWPI)	SBB 301 WP	(IWPI)	(IWPI)
$V_{\text{Sp,TWW}}$:	418 *l*	175 *l*	301 *l*	175 *l*	175 *l*
I_{TWW}:	1.762 €	0 €	2.166 €	0 €	0 €
l_{EWS}:	203 m	119 m	119 m	93 m	75 m
I_{EWS}:	14.007 €	8.211 €	8.211 €	6.417 €	5.175 €
I_{ges}:	59.397 €	53.089 €	54.499 €	50.469 €	48.888 €
SCOP:	4,515	4,523	4,523	4,037	3,32
HS-Anteil:	–	1,5 %	1,5 %	4,7 %	9,8 %
K im 20. Jahr:	43.123 €	50.644 €	48.364 €	50.513 €	46.574 €
Amortisation:	4-5 a	2-3 a	3-4 a	1-2 a	1-2 a
CO_2e über 20 Jahre:	33,7 t	32,5 t	33,8 t	36,5 t	44,3 t
PE über 20 Jahre:	165,6 MWh	160,0 MWh	166,1 MWh	179,3 MWh	218 MWh

CO_2e = summierte Menge an CO_2-Äquivalenten über 20 Jahre; HS = Heizstab; I_{EWS} = Investitionskosten der Erdwärmesonden; I_{ges} = Investitionskosten des Gesamtsystems; I_{Puffer} = Investitionskosten des Pufferspeichers; I_{TWW} = Investitionskosten des TWW-Speichers; I_{WP} = Investitionskosten der Wärmepumpe; IWPI = in WP integriert; K = Differenzkapitalwerte zur Gasbrennwerttherme; l_{EWS} = Erdwärmesondenlänge = Gesamtbohrmeter; $P_{\text{Nenn,HS}}$ = Nennleistung des Heizstabes; $P_{\text{Nenn,WP}}$ = Nennleistung der Wärmepumpe; PE = Primärenergie; V_{Puffer} = Pufferspeichervolumen; $V_{\text{Sp,TWW}}$ = TWW-Speichervolumen; WP = Wärmepumpe

Innerhalb der Wärmepumpe *WPC 07* ist, im Gegensatz zur *WPF 13 M*, ein TWW-Speicher im Wärmepumpengerät integriert, sodass Kosten und Wärmeverluste eingespart werden können. Aufgrund geringerer Wärmeverluste und einem annähernd gleichen SCOP können der Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie die THG-Emissionen durch die Konfigurationsänderung um drei Prozent reduziert werden. Wird stattdessen die Wärmepumpe *WPF 07* ausgewählt, verfallen die zuvor genannten Vorteile, da in dieser Wärmepumpe kein TWW-Speicher integriert ist.

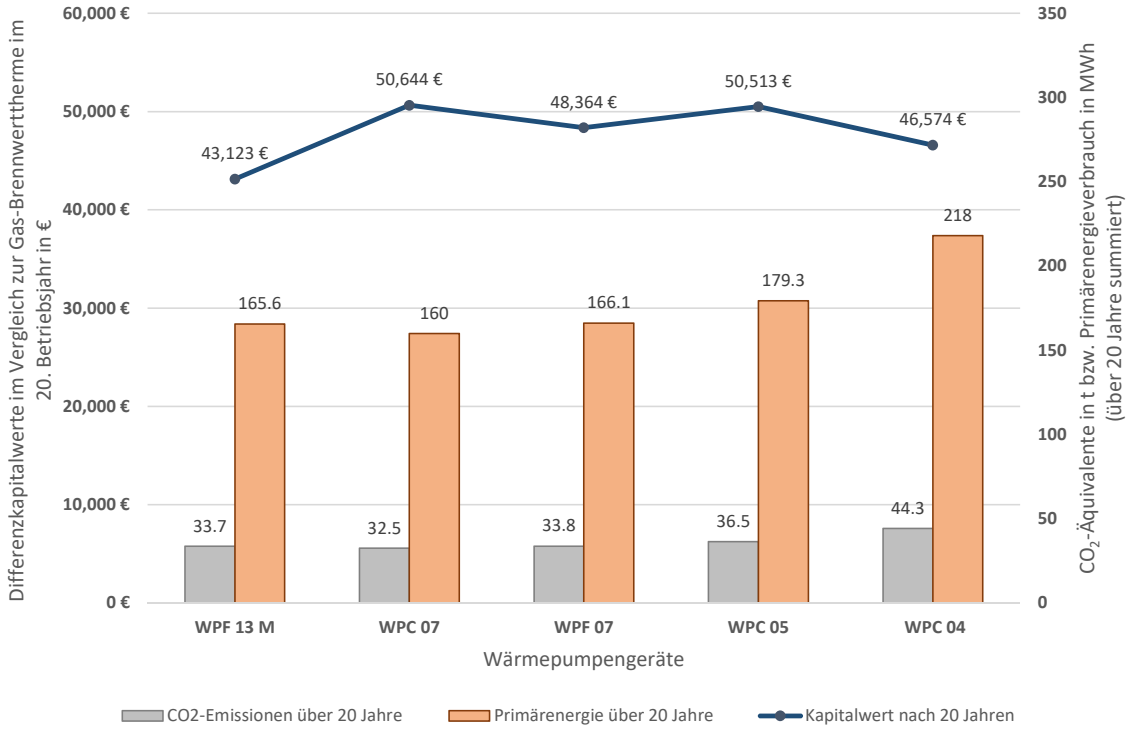


Abb. 4.2.: Differenzkapitalwerte im Vergleich zur Gasbrennwerttherme im 20. Betriebsjahr sowie über 20 Jahre summierte CO_2-Äquivalente und Primärenergiebedarfe für die Systemvarianten von *HP05*

Durch die Auswahl von monoenergetischen Wärmepumpen mit noch kleineren Nennleistungen (*WPC 05* und *WPC 04*) sinken einerseits die berechneten Gesamtbohrmeter der Erdwärmesonden, die Investitionskosten des Gesamtsystems und die Amortisationszeiten. Andererseits steigt der Heizstabanteil. Dadurch sinken der SCOP und die Differenzkapitalwerte zur Gasbrennwerttherme gegenüber der Wärmepumpe *WPC 07*. Als Folge des kleineren SCOP steigen die THG-Emissionen und der Primärenergiebedarf.

Die Auswahl von am Markt verfügbarer Komponenten und die Berücksichtigung damit einhergehender Änderungen in der Konfiguration ermöglichen detaillierte ökonomische und ökologische Bewertungen. Zusätzlich können Parameter wie z. B. die CO_2-Bepreisung, die Strom- und Gaspreisänderungsraten, die CO_2-Äquivalente und Primärenergiefaktoren für jedes Jahr der Betrachtungsperiode variiert sowie deren Auswirkungen auf die Systemkonfiguration getestet und analysiert werden. Beispielsweise induziert eine zukünftige Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im deutschen Strommix eine Reduzierung der CO_2-Äquivalente und Primärenergiefaktoren für Strom. Diese Entwicklungen begünstigen den Einsatz von Wärmepumpensystemen. Detaillierte Sensitivitätsanalysen der Konfigurationsparameter von GeoWPSys+Web und Auswirkungen der automatisierten Speichervorschläge aus GeoWPSys+ auf die Bewertungsparameter und Wärmepumpensimulationen sind in zu-

künftigen Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen geplant.

Im nächsten Planungsprozessschritt können einflussreiche Parameter wie der Heizstabanteil oder der SCOP, die in GeoWPSys+Web auf der Grundlage von Berechnungsvorschriften und Tabellen aus VDI 4645 [2018] und VDI 4650 [2019] ermittelt werden, durch Wärmepumpensimulationen mit ModHPS überprüft werden. ModHPS benötigt die Wärmequellenaustrittstemperatur als Inputparameter in jedem Zeitschritt. Sie kann u. a. für eine vereinfachte Berechnung konstant angenommen, anhand eines Jahresverlaufs eingelesen oder über die bidirektionale Kopplung an ein Untergrundmodell bereitgestellt werden. In Tabelle 4.5 sind die durch ModHPS simulierten Heizstabanteile und die simulierten JAZ_{WPA} (mit der Bilanzgrenze um die Wärmepumpenanlage, vgl. Abbildung 2.7) für die Geräte *WPC 05* und *WPC 04* anhand von verschiedenen Randbedingungen der Wärmequellenaustrittstemperatur sowie die in GeoWPSys+Web ermittelten Werte gegenübergestellt.

Tab. 4.5.: Durch ModHPS simulierte Heizstabanteile und JAZ_{WPA} im Vergleich zu den Berechnungen in GeoWPSys+Web anhand von verschiedenen Temperaturrandbedingungen der Wärmequellenaustrittstemperatur für die Wärmepumpe *HP05*

	WPC 05						WPC 04					
RB	K	0 °C	2 °C	10 °C	UG_{15}	UG_1	K	0 °C	2 °C	10 °C	UG_{15}	UG_1
HZA in %	5	11	8	2	8	7	10	27	23	9	22	20
JAZ_{WPA}	4,04	3,31	3,66	4,97	3,84	3,99	3,32	2,43	2,63	3,94	2,81	2,93

HZA = Heizstabanteil; JAZ_{WPA} = JAZ der Bilanzgrenze Wärmepumpenanlage nach VDI 4650; K = die aus GeoWPSys+Web ermittelten Werte (Heizstabanteil und SCOP); RB = Berechnungs- /Simulationsrandbedingung; UG_{15} = Temperaturprofil aus der gekoppelten Simulation aus ModHPS und dem numerischen Untergrundmodell (MPFluidGeTIS) für das 15. Betriebsjahr

In Anlehnung an die Dimensionierung von Erdwärmesonden und Sole-Wasser-Wärmepumpen sowie an die Berechnung des SCOP wurden als konstante Temperaturrandbedingungen Wärmequellenaustrittstemperaturen von 0 °C und 2 °C gewählt. Zur Abbildung eines maximalen Energieangebots aus dem Untergrund werden die Systeme zusätzlich mit einer konstanten Wärmequellenaustrittstemperatur von 10 °C, entsprechend der ungestörten Erdreichtemperatur, simuliert. Mit steigenden Wärmequellenaustrittstemperaturen sinkt der Heizstabanteil und die simulierte JAZ steigt. Der im Systemkonfigurator ermittelte Heizstabanteil und der SCOP liegen für beide Wärmepumpengeräte im Bereich zwischen den Werten aus den Simulationen mit 2 °C und 10 °C. Zusätzlich zu den konstanten Temperaturrandbedingungen wurden die Wärmepumpen anhand von zwei Jahresverläufen der Wärmequellenaustrittstemperatur simuliert. Die Wärmequellenaustrittstemperaturverläufe entstammen der gekoppelten Simulation von ModHPS und MPFluidGeTIS für die Wärmepumpe *HP05* des Fallbeispiels aus van Treeck et al. [2020] für das erste und 15. Betriebsjahr (siehe Abbildung F.8).

Die Heizstabanteile des Geräts *WPC 04* sind durchgängig höher und die simulierten JAZ geringer als bei der Wärmepumpe *WPC 05*. Darüber hinaus weichen die mit ModHPS simulierten Heizstabanteile stark von den im Konfigurator ermittelten Werten ab, mit der Ausnahme der 10 °C-Simulation der *WPC 04*. Beispielsweise ist der simulierte Heizstaban-

teil der Wärmepumpe *WPC 04* für das 15. simulierte Jahr mit 22 % mehr als doppelt so groß wie der im Systemkonfigurator bestimmte Wert.

Der Heizstabanteil bzw. der Deckungsanteil der Wärmepumpe wird in GeoWPSys+Web in Anlehnung an VDI 4645 [2018] und VDI 4650 [2019] anhand des Anteils der Wärmepumpennennleistung an der Gebäudeheizlast tabellarisch ermittelt. Die Tabellenwerte wurden auf Grundlage von Klimadatensätzen für einzelne Normaußentemperaturen (−16 °C, −14 °C, −12 °C und −10 °C) sowie für einzelne Heizgrenztemperaturen (15 °C, 12 °C und 10 °C) bestimmt [VDI 4645, 2018] und sind als ungefähre Durchschnittswerte anzusehen. Im realen Wärmepumpenbetrieb können die Deckungsanteile in Folge witterungsbedingter jährlicher Schwankungen der Außenlufttemperaturen deutlich abweichen [VDI 4645, 2018]. Auch bei der Verwendung von anderen Klimadatensätzen innerhalb von Wärmepumpensimulationen oder bei der Änderung des Projektstandorts und somit abweichenden Normaußentemperaturen können sich die Deckungsanteile im Vergleich zu den Tabellenwerten unterscheiden.

Im Gegensatz dazu simuliert ModHPS die Deckungsanteile und die JAZ von am Markt verfügbaren Wärmepumpengeräten u. a. unter Berücksichtigung von stundengenauen Gebäudelasten (die wiederum auf Grundlage von Standortwetterdaten ermittelt wurden), der implementierten Wärmepumpenregelung samt Taktverhalten und den angeschlossenen Puffer- und TWW-Speichern. Aus vorgenannten Gründen sind die mit ModHPS simulierten Deckungsanteile und JAZ als realistischer einzustufen im Vergleich zu den in GeoWPSys+Web berechneten Werten. An dieser Stelle kann die Überprüfung der Konfiguratorwerte durch die angebundenen Wärmepumpensimulationen demonstriert werden.

Der Ergebnisvergleich der beiden Wärmequellenaustrittstemperaturprofil-Simulationen (UG_1 und UG_{15}) zeigt die Effizienzreduktion des Systems aufgrund sinkender Untergrundtemperaturen über die zunehmende Simulationsdauer. Um eine Unterdimensionierung der Anlage zu verhindern, sollten Untergrundberechnungswerkzeuge bis zu fünfzig Betriebsjahre simulieren und den Temperaturverlauf des letzten Betriebsjahres für die Planung ansetzen. Mithilfe der Kopplung von ModHPS und numerischen bzw. analytischen Untergrundmodellen können die Dynamiken des Untergrundes sowie die Dynamiken zwischen der Anlagentechnik und dem Untergrund in der Systemkonfiguration berücksichtigt werden.

Insgesamt sind die JAZ und der Heizstabanteil der Wärmepumpensimulationen stark von der Temperaturrandbedingung auf der Wärmequellenseite abhängig. Die Unterschiede der Simulationsergebisse verdeutlichen den Bedarf an einer zukünftigen Kopplung des Wärmepumpenmodells mit einem schnell rechnenden Untergrundmodell, sodass die Dynamiken zwischen Ober- und Untergrund hinreichend genau abgebildet und Simulationsergebnisse ohne lange Wartezeit erzeugt werden können. Insbesondere für eine genauere Bestimmung der Erdwärmesondenlänge sind zukünftig die Kopplung von ModHPS an ein analytisches Untergrundmodell und die automatisierte Anbindung der gekoppelten Simulationen an den Systemkonfigurator geplant.

Die Wahl der Wärmepumpenbetriebsweise hat Auswirkungen auf die Nennwärmeleistung der Wärmepumpe und dadurch auf die berechnete Gesamterdwärmesondenlänge (vgl. Tabelle

4.4). Bei einem Wechsel der Wärmepumpe des Typs WPF 13 M zu einem monoenergetischen Betrieb mit dem Gerät WPC 05 sinkt die im Konfigurator berechnete Gesamterdwärmesondenlänge von 203 m auf 93 m ab. Bei einer beispielhaften Bohrtiefenbegrenzung von 100 m sind im ersten Fall drei Erdwärmesonden und im zweiten Fall nur eine Erdwärmesonde notwendig. Aufgrund dessen ist in Anlehnung an den Planungsablauf in Abbildung 3.3 die ursprüngliche Platzierung der Erdwärmesonden im Geoinformationssystem (vgl. Abbildung 4.1b) anzupassen. Bei der Berücksichtigung der gegenseitigen thermischen Beeinflussung von Erdwärmesonden hat die geänderte Sondenkonfiguration wiederum Auswirkungen auf die gekoppelten Wärmepumpen- und Untergrundsimulationen, sodass ein iterativer Prozess entsteht.

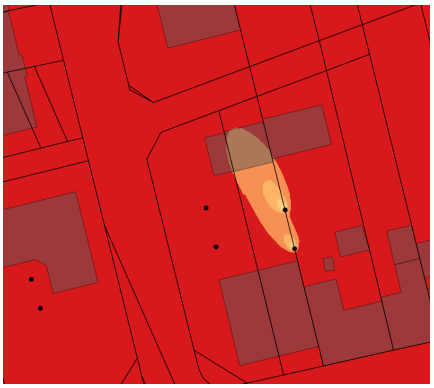
Eine detaillierte Dimensionierung mit Berücksichtigung der dynamischen Abhängigkeiten zwischen dem Untergrund sowie dem geothermischen Quellen- und Wärmepumpensystem kann die Kosten und die ökologischen Auswirkungen des Gesamtsystems senken. Mit Informationen zu Schichtaufbauten und Grundwasserströmungen können zudem Bereiche mit hohen maximalen spezifischen Entzugsleistungen im Untergrund identifiziert werden. Dadurch ist gegebenenfalls eine Reduzierung der Gesamtsondenlänge möglich, z. B. durch mehrere kürzere Erdwärmesonden. Hierbei sind die gegenseitigen thermischen Beeinflussungen der Sonden, das sondeninterne Strömungsverhalten und dessen Auswirkungen auf die Entzugsleistung sowie Kosten für den Versatz des Bohrgerätes den Einsparungen gegenüberzustellen.

Mit der Kopplung von ModHPS und MPFluidGeTIS können der Einfluss von Grundwasserströmungen, daraus resultierende Temperaturfahnen im Untergrund und die Beeinflussung von Erdwärmesonden untereinander untersucht werden. Der Betrieb von bestehenden Erdwärmesonden und die Ausbreitung daraus resultierender Temperaturfahnen können Auswirkungen auf die Entzugsleistungen und nutzbaren Energiemengen benachbarter oder neu geplanter Sonden haben.

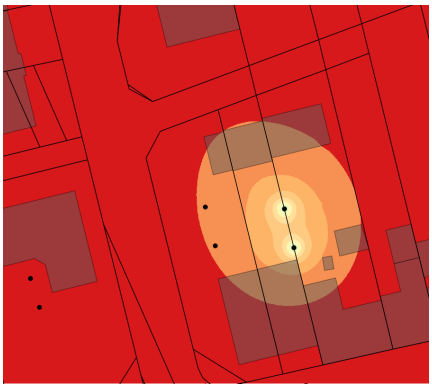
In Abbildung 4.3 sind das berechnete Gebiet der gekoppelten Simulation und die simulierten Temperaturfahnen der Erdwärmesonden in verschiedenen Tiefen für das Fallbeispiel aus van Treeck et al. [2020] dargestellt. Zu Testzwecken wurden die beiden Erdwärmesonden auf der östlichen Flurstücksgrenze von Gebäude *655122* platziert. In Anbetracht der länderspezifischen Abstandsempfehlungen zu Nachbargrundstücken wären die betrachteten Erdwärmesonden wahrscheinlich nicht genehmigungsfähig. Zur Steigerung der Nutzerfreundlichkeit könnten zukünftig Warnmeldungen bezüglich genehmigungsrechtlicher Restriktionen innerhalb des Geoportals integriert werden. Die Temperaturfahnen sind als GeoTiffs im Geoportal dargestellt. Aufgrund der vorhandenen hydrogeologischen Situation breiten sich die Temperaturfahnen in verschiedenen Tiefen unterschiedlich stark aus. In 20 m Tiefe ragen die Temperaturfahnen kaum über die Flurstücksgrenzen hinaus, wohingegen in 30 m und 80 m Tiefe Überlappungen der Temperaturfahnen und angrenzenden Sonden zu erkennen sind.

Die Deutung der Temperaturfahnen in Hinblick auf die Genehmigungsfähigkeit obliegt den Genehmigungsbehörden und kann, abhängig vom Bundesland, zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dennoch können der Einsatz von Untergrundsimulationen und die Visualisie-

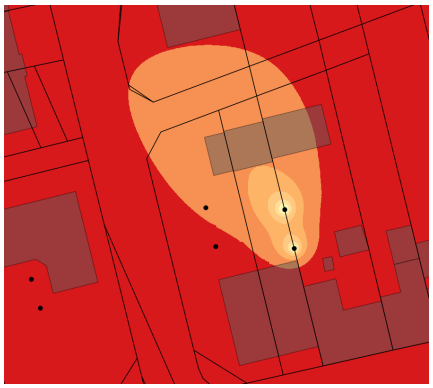
(a) Grauer Bereich: Berechnetes Gebiet [van Treeck et al., 2020]



(b) GeoTiff: Schnitt in 20 m Tiefe [van Treeck et al., 2020]



(c) GeoTiff: Schnitt in 30 m Tiefe [van Treeck et al., 2020]



(d) GeoTiff: Schnitt in 80 m Tiefe [van Treeck et al., 2020]

Abb. 4.3.: Ergebnisse der gekoppelten Simulation von ModHPS und MPFluidGeTIS für die Erdwärmesonden des Gebäudes *655122* (Talstraße 28; *HP05*) zum Ende des 15. Betriebsjahres. (Die Konturen in den GeoTiffs entsprechen der Abstufung von 0,5 K.)

rung von Temperaturfahnen die Bewertungsgrundlage verbessern und somit den Genehmigungsprozess und die kommunale Wärmeplanung unterstützen. Insbesondere in Gebieten mit einer hohen Erdwärmesondeninstallationsdichte ist, im Sinne einer gerechten Nutzung der geothermischen Energie, die gegenseitige thermische Beeinflussung zu überprüfen. Darüber hinaus erhöhen gekoppelte Untergrund- und Wärmepumpensimulationen die Berechnungsgenauigkeit der Erdwärmesondenlängen und damit die Güte der Gesamtsystemdimensionierung.

5. Schlussbetrachtung

5.1. Zusammenfassung

Oberflächennahe geothermische Potenziale werden in Deutschland bislang nicht voll ausgeschöpft. Gründe dafür sind, neben einem akuten Fachkräftemangel in den Bereichen Sanitär- und Heizungshandwerk, Brunnenbau und Bohrarbeiten sowie hohen Investitionskosten, insbesondere die hohe Planungs- und Genehmigungskomplexität. Durch die verschiedenen an der Planung beteiligten Akteure entstehen Schnittstellen, die wiederum zu Transferlücken und Dimensionierungsfehlern führen können. Zur Hebung der Potenziale und Optimierung der Systemdimensionierung sind ein ganzheitlicher Planungsprozess und die Kombination von verschiedenen Planungswerkzeugen notwendig.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde das Mehrebenen-Planungswerkzeug PlanGeoWP vorgestellt, das die Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden auf den Skalen von Einzelgebäuden bis auf Quartiersebene ermöglicht und den Planungsprozess durch detaillierte Analysemöglichkeiten der Systemzusammenhänge und Ergebnisvisualisierungen unterstützt. Mithilfe des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Systemkonfigurators können geothermische Wärmepumpensysteme detailliert dimensioniert, mit konventionellen Systemen verglichen sowie anhand von technischen, energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien bewertet werden.

In der Planungspraxis oberflächennaher geothermischer Quellenanlagen wird das Systemverhalten von Wärmepumpen meist vereinfacht abgeschätzt und die dynamischen Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe und Wärmequellenanlage nicht ausreichend abgebildet, obwohl die Wärmepumpe durch ihren Betrieb maßgeblich die Wirtschaftlichkeit, die THG-Emissionen und die Gesamtsystemeffizienz beeinflusst. Zur detaillierteren Abbildung der Wärmepumpe innerhalb des Planungsprozesses sowie zur Überprüfung der konfiguratorinternen Berechnungen und einflussreicher Entscheidungsparameter wie der JAZ wurde ein auf die Funktionalitäten des Systemkonfigurators abgestimmtes und auf den frühen Planungsprozess spezialisiertes Open-Source-Wärmepumpensystemmodell entwickelt. Das Modell nutzt thermische Speicherbilanzen, enthält Regelungsalgorithmen, ist auf Stadtquartiersebene einsetzbar und mit Untergrund- bzw. Wärmenetzmodellen bidirektional koppelbar. ModHPS simuliert, u. a. anhand von Herstellerdaten am Markt verfügbarer Wärmepumpengeräte und stundengenauer Gebäudelasten für Heizung, Kühlung und TWW, Ergebnisparameter wie z. B. Volllaststunden, Deckungsanteile und JAZ für verschiedene Bilanzgrenzen.

Zur Bestimmung der stundengenauen Gebäudelastkurven für Heizung und TWW und zur Berücksichtigung unterschiedlicher Datengrundlagen wurden zwei Berechnungsprozesse entwickelt und die beteiligten Werkzeuge in PlanGeoWP integriert. In der ersten Variante werden die Lastkurven mit SCoTED auf der Grundlage eines Energiebedarfswertes oder der Normheizlast und weiterer Parameter wie z. B. Standortwetterdaten, TWW-Zapfprofilen sowie der Normaußen- und Heizgrenztemperatur erzeugt. Sind die Energiebedarfe oder die Normheizlast nicht bekannt, können die Heizlastkurven über den TEASER-Workflow anhand von wenigen Eingabeparametern simuliert werden. Anschließend wird SCoTED zur Bestimmung der TWW-Lastkurven ausgeführt.

Die Gebäudeberechnungswerkzeuge und ModHPS können aus GeoWPSys+Web heraus automatisiert angesteuert und deren Ergebnisse zur weiteren Systemkonfiguration genutzt werden. Zusätzlich werden in GeoWPSys+Web zahlreiche Hilfestellungen zur erleichterten Bedienung durch Informationsbuttons mit erklärenden Texten, Hintergrundberechnungen sowie die Angabe von möglichst vielen Beispielwerten und Auswahllisten gegeben. Die Parameterabhängigkeiten werden unmittelbar bei der Eingabe berechnet und visualisiert. Die Kombination aus der Systemkonfiguration anhand von am Markt verfügbaren Geräten, Hilfestellungen für den Nutzer, der unmittelbaren Ergebnisdarstellung und der automatisiert angebundenen Simulationen ermöglicht einen iterativen, nutzerfreundlichen und praxistauglichen Dimensionierungsprozess.

Die Anbindung der Werkzeugkette an ein bestehendes Web- und GIS-basiertes Geoportal samt Datenbanken ermöglicht eine zentrale Datenaggregation und geothermische Standortanalysen. Dadurch können der Antrags- und Genehmigungsprozess von oberflächennahen geothermischen Systemen und ganzheitliche Planungsansätze wie die kommunale Wärmeplanung unterstützt werden.

Der simulationsbasierte Planungsprozess von PlanGeoWP wurde in Kapitel 4 anhand eines Beispielquartiers demonstriert. Die Integration von Berechnungswerkzeugen für den Ober- und Untergrund in eine schnittstellenübergreifende Simulationskette sowie die Möglichkeit, komplexe Zusammenhänge in der Dimensionierung geothermischer Wärmepumpensysteme nutzerfreundlich darstellen und analysieren zu können, trägt dazu bei, vorhandene Transferlücken zwischen verschiedenen Gewerken im Planungsprozess zu schließen.

Durch die Kombination aus der weitgehend automatisierten Datenaggregation, der Ermöglichung von geothermischen Standortbewertungen, der Systemkonfiguration sowie angebundenen Simulationen mit kurzen Rechenzeiten werden alle eingangs gestellten Forschungshypothesen aufgegriffen und die übergeordneten Ziele der vorliegenden Arbeit erfüllt.

5.2. Diskussion und Ausblick

PlanGeoWP und die beteiligten Werkzeuge weisen verschiedene Limitationen und Vereinfachungen auf. Im Folgenden werden die einzelnen Werkzeuge und die resultierende Werk-

zeugkette kritisch betrachtet sowie Verbesserungs- und zukünftiges Forschungspotenzial diskutiert.

Ein Diskussionspunkt ist die Anbindung der Werkzeugkette an das im Projekt GeTIS entwickelte Geoportal, da es nicht öffentlich verfügbar ist und nicht vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Somit ist die Abhängigkeit an den Fortbestand und die Lauffähigkeit des GeTIS-Geoportals kritisch zu bewerten. Die Anbindung an das GeTIS-Geoportal erfolgte über den Import der zentralen XML-Datei, die durch den Systemkonfigurator und die angebundenen Simulationen mit Informationen und Simulationsergebnissen angereichert wird. Bei einer zukünftigen Anbindung der Werkzeugkette an öffentlich zugängliche Geoportale und Web-Plattformen ist entweder die fehlerfreie Erstellung dieser XML-Datei durch die Geoportale zu gewährleisten oder die Erstellung der XML-Struktur entsprechend der Anforderungen der Geoportale anzupassen.

Bei der Nutzung von ModHPS sind die in Abschnitt 3.4.1 aufgezeigten Limitationen, Annahmen und Vereinfachungen zu berücksichtigen. Eine Limitation ist beispielsweise die Beschränkung von ModHPS auf taktende Sole-Wasser-Wärmepumpen. Bezüglich der aktuellen Marktverfügbarkeit von Wärmepumpengeräten sollten zukünftig auch Regelungsalgorithmen für leistungsgeregelte Wärmepumpen implementiert werden. Weiterhin ist der Einfluss der Zeitschrittweite auf die Ergebnisgüte von ModHPS, insbesondere in Bezug auf die vereinfachten Speicherbilanzen, kritisch zu hinterfragen und durch weitere auf die Analysen aus van Treeck et al. [2020] aufbauenden Parameterstudien zu quantifizieren.

Historisch bedingt bestehen zwei Varianten des Systemkonfigurators: GeoWPSys+ als detailliertes Planungsprogramm in Form einer Desktopanwendung und GeoWPSys+Web als ein Web-Konfigurator mit einer übersichtlichen und vereinfachten Nutzerführung sowie eingeschränkten Eingabemöglichkeiten und Funktionen. Angesichts der zwei Programmversionen lassen sich unterschiedliche Zielgruppen definieren. Die Zielgruppen von GeoWPSys+ sind u. a. Ingenieurbüros und Fachplaner, die mit den komplexen Zusammenhängen zwischen Untergrund, Gebäude- und Wärmepumpe umgehen können. GeoWPSys+Web bedient vorwiegend die Zielgruppe der Entscheidungsträger wie z. B. Stadtwerke, Kommunen, Generalplaner oder Kontraktoren, die ein weniger spezialisiertes Fachwissen in den Bereichen TGA und TBA aufweisen und deswegen einer strikten Nutzerführung bedürfen.

Innerhalb der verschiedenen Versionen des Systemkonfigurators werden die Gesamtlänge der Erdwärmesonden vereinfacht berechnet. Für eine detailliertere Ermittlung der Gesamtbohrmeter soll ein Untergrundmodell mit schnellen Rechenzeiten in PlanGeoWP integriert werden, das mit ModHPS bidirektional gekoppelt werden kann und die benötigte Erdwärmesondenlänge als Ergebnis ausgibt.

Die Wärmepumpensysteme werden mit einem Gas-Brennwertkessel vergleichen. In Anbetracht der aktuellen politischen Entwicklungen, Regularien und Förderungsstrukturen sind zusätzlich Vergleiche mit anderen Systemen wie z. B. Luft-Wasser-Wärmepumpen sowie Solarthermie- und PV-Anlagen erforderlich. Aufgrund der modularen Ansätze von GeoWPSys+,

GeoWPSys+Web und ModHPS können die zuvor beschriebenen Erweiterungen grundsätzlich implementiert werden.

Eine Limitation der verschiedenen Programmversionen des Systemkonfigurators ist die Vernachlässigung der Kosten für die energetische Sanierung eines Bestandsgebäudes. Durch die Integration entsprechender Kostenparameter könnte GeoWPSys+Web auch für die Erarbeitung von Sanierungsstrategien einzelner Gebäude im Zuge der Energieberatung eingesetzt werden. Zusätzlich könnten auch Gebäudeeigentümer bei der Auswahl eines zukunftsfähigen, ökologischen und ökonomischen Wärmeerzeugers unterstützt werden. Die Erweiterung des Anwenderkreises von GeoWPSys+Web um Nutzer wie z. B. Energieberater oder Gebäudeeigentümer erzeugt zusätzlichen Implementierungsaufwand.

Darüber hinaus birgt die Entwicklung von mehreren ähnlichen Werkzeugen das Risiko von Redundanzen. Zukünftig ist deshalb zu entscheiden, ob beide Varianten weiterentwickelt werden, um gegebenenfalls verschiedene Verstetigungsstrategien offen zu halten, ob zusätzliche Varianten entstehen, um den Anwenderkreis zu maximieren oder ob die Spezialisierung auf ein Werkzeug und die damit angesprochene Nutzergruppe förderlicher ist. Dazu sind PlanGeoWP, der gewerkeübergreifende Planungsprozess und die beteiligten Werkzeuge in weiteren Forschungsprojekten und in der Praxis zu testen und hinsichtlich der identifizierten Nutzergruppen zu optimieren. Die Anwendbarkeit von PlanGeoWP, die Berechnungsweisen, Eingabemöglichkeiten und Visualisierungen innerhalb des Systemkonfigurators sowie dessen Bedienbarkeit, Nutzerführung und die notwendige Nutzerexpertise sollten u. a. mit Stadtwerken, Fachplanern, kommunalen Entscheidungsträgern und Genehmigungsbehörden diskutiert werden.

Zusätzlich kann die Speicherung der Komponentendaten innerhalb von PlanGeoWP optimiert werden. Die technischen Daten und Komponentenpreise sind momentan in der Komponenten-XML-Datei gespeichert. Eine zukünftige Auslagerung der Datenspeicherung in eine Datenbankstruktur ermöglicht eine effizientere Datenhaltung. Zudem sollten die Herstellerdaten bezüglich aktuell am Markt verfügbarer Komponenten aktualisiert und die Datenbasis um verschiedene Hersteller erweitert werden.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die frühe Planungsphase und die Anwendung von Berechnungswerkzeugen mit wenigen Eingabeparametern. Vor diesem Hintergrund sind die Anzahl der Eingangsparameter von ModHPS und GeoWPSys+Web sowie die zur Bedienung erforderliche Nutzerexpertise kritisch zu hinterfragen. Einerseits sollen die Werkzeuge in der frühen Planungsphase und auf Quartiersebene einsatzfähig sein, andererseits sollen möglichst genaue Ergebnisse erzielt werden. Somit ist zwischen einem möglichst hohen Detailgrad zur Abbildung aller relevanten Einflussfaktoren und einer geringen Komplexität zur Einsatzfähigkeit des Mehrebenen-Planungswerkzeugs in der Praxis abzuwägen. Durch den geschlossenen Arbeitsfluss innerhalb von PlanGeoWP mit im Hintergrund laufenden Simulationen und Berechnungen wird dennoch eine intuitive Bedienbarkeit gewährleistet.

Aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit auf die frühe Planungsphase werden Dynamiken wie z. B. Wechselwirkungen zwischen der thermischen Speichermasse eines Fußboden-

heizungssystems und der Wärmepumpe bzw. den thermischen Speichern nicht detailliert abgebildet. Durch eine zukünftige Nutzung von thermisch-energetischen Gebäudesimulationen und deren bidirektionale Kopplung an numerische Untergrundmodelle können auch spätere Planungsphasen bis zur Detailplanung mit PlanGeoWP abgebildet werden. Dadurch werden jedoch die Anforderung an die Nutzerexpertise und der Gebäudeinformationsbedarf erhöht.

Insbesondere auf Quartiersebene sind der erhöhte Datenbedarf und die Detailtiefe der Gebäudemodelle gegeneinander abzuwägen. Zusätzlich sind auf Quartiersebene Wärmeversorgungsvarianten mit Wärmenetzen in die Planung miteinzubeziehen. Quartiersbetrachtungen mit geothermisch gespeisten Nahwärmenetzen erfordern Wärmenetzsimulationen, die einerseits an ModHPS und andererseits an ein Untergrundmodell gekoppelt werden können. Die Erweiterung des Einsatzbereichs von PlanGeoWP um Wärmenetzsimulationen und die Integration von dynamischen, thermisch-energetischen Gebäude- und Quartierssimulationen für den Einsatz in der Detailplanung sind innerhalb des bereits laufenden Forschungsprojekts GeoWaermeWende (FKZ: 03EN3059A) geplant. Zusätzlich sollen in GeoWaermeWende u. a. Wettereinflüsse auf den oberflächennahen Untergrund abgebildet und eine georeferenzierte Wärmenetzplanung innerhalb des Systemkonfigurators ermöglicht werden. Darüber hinaus sollen weitere geothermische Quellenanlagentypen wie z. B. Erdwärmekollektoren innerhalb analytischer Modelle modelliert werden. Zusätzliche Informationen über Bauwerke im Untergrund, wie z. B. U-Bahntunnel, Tiefgaragen und bestehende Gas- oder Wärmenetze, würden die Analyse des Platzangebots für geothermische Systeme und die Entscheidungsfindung insbesondere auf Quartiersebene verbessern. Diese und weitere Informationen sollten zukünftig noch in das Geoportal, die Datenbankstrukturen und Web-Services integriert werden.

Neben der Nutzung des Web-Geoportals aus dem Projekt GeTIS ist die Anbindung der Werkzeugkette an etablierte Web-Plattformen der geologischen Dienste in Deutschland denkbar. Das sind u. a. Geothermie in NRW – Standortcheck [NRW, 2022], der Geologie Viewer [HLNUG, 2022] in Hessen, der UmweltAtlas Angewandte Geologie [Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022] in Bayern oder das EU-weite Geoportal Hotmaps [Hotmaps, 2023], das zudem eine Berechnungsweise [Pezzutto et al., 2022] beinhaltet, mit dem das standortspezifische Potenzial für die oberflächennahe Geothermie anhand der Methodik nach Casasso u. Sethi [2016] GIS-basiert abgeschätzt werden kann [Pezzutto et al., 2019].

Mit einer steigenden Einbindung dezentraler regenerativer Energiequellen in die Energieversorgung wächst der Bedarf an Planungswerkzeugen und maßgeschneiderten Werkzeugketten, welche die einzelnen Teilsysteme sowie die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen abbilden können. In Anbetracht der aktuellen Wärmepumpeninstallationszahlen ist die Erweiterung von GeoWPSys+Web und ModHPS zur Abbildung von Luft-Wasser-Wärmepumpen zu überprüfen. Des Weiteren könnte PlanGeoWP um Werkzeuge zur Abbildung von Abwärmequellen und zur georeferenzierten Potenzialermittlung erneuerbarer Energien wie z. B. Photovoltaik oder Solarthermie erweitert werden, um ganzheitliche Systemvariantenvergleiche und Dekarbonisierungsstrategien im Zuge der kommunalen Wärmeplanung erstellen

zu können. Darauf aufbauend könnten weitere Bewertungskriterien wie z. B. der Eigennutzungsanteil des regenerativ erzeugten PV-Stroms für den Betrieb der Wärmepumpe oder der Autarkiegrad des Gesamtsystems ermittelt werden.

Neben den zuvor diskutierten Erweiterungen und Optimierungspotenzialen sind detaillierte Sensitivitätsanalysen der Konfigurationsparameter von GeoWPSys+Web in zukünftigen Veröffentlichungen geplant. Ein weiteres wesentliches Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten ist die Abbildung des Einflusses geothermischer Kühlung auf den Dimensionierungsprozess innerhalb des Systemkonfigurators und der angebundenen Simulationen. Dazu ist ein weiteres Berechnungswerkzeug in PlanGeoWP einzubinden, das stundengenaue Kühllastkurven als Ergebnis ausgibt. Das Werkzeug wird derzeit im Projekt GeoWaermeWende entwickelt und bezüglich der Integrationsfähigkeit in PlanGeoWP optimiert.

Bezüglich einer zukünftigen Verstetigung von PlanGeoWP sind beispielsweise das Anbieten von Planungsleistungen oder Planungssoftware sowie die Unterstützung von Genehmigungsbehörden und geologischen Diensten bei der Weiterentwicklung geothermischer Informationssysteme und der Automatisierung des Genehmigungsprozesses möglich. Aufgrund der zwei prototypisch umgesetzten Programmversionen des Systemkonfigurators ergeben sich verschiedene Softwareverstetigungsansätze wie z. B. der Vertrieb des Konfigurators als Desktopversion oder der Verkauf von Lizenzen für den Web-Konfigurator. Ein mögliches Geschäftsmodell wären Lizenzen mit verschiedenen Zugriffsrechten und Detailgraden bezüglich der Dimensionierungs- und Berechnungsmöglichkeiten. Die Lizenzierungsstrategie erfordert die Implementierung einer serverseitigen Nutzerverwaltung mit Anmeldung und Passwortschutz sowie der Vorhaltung von gespeicherten Simulationsaufträgen. Darüber hinaus könnten kontinuierlicher Support und Schulungskonzepte in Form von Webinaren oder Tutorials angeboten werden.

Literaturverzeichnis

[Afjei u. Dott 2011] Afjei, T. ; Dott, R.: Heat pump modelling for annual performance, design and new technologies. In: *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2011, S. 2431–2438

[Agora 2021] Agora, Energiewende: Ein Gebäudekonsens für Klimaneutralität – 10 Eckpunkte wie wir bezahlbaren Wohnraum und Klimaneutralität 2045 zusammen erreichen – IMPULS. 2021. – Forschungsbericht

[AHO 2011] AHO: *Planungsleistungen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie, Leistungsbild und Honorierung, Nr. 26.* Köln : Bundesanzeiger Verlag, 2011 (AHO Schriftenreihe). – ISBN 978–3–89817–958–4. – erarbeitet von dem AHO-Arbeitskreis Oberflächennahe Geothermie", AHO Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordung e. V.

[Ali-Toudert u. Ji 2019] Ali-Toudert, F. ; Ji, L.: A multi-scale and GIS-based investigation of climate change effects on urban climate and building energy demand for the city of Stuttgart. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 1343 IOP Publishing, 2019, S. 012008

[Allegrini et al. 2015] Allegrini, J. ; Orehounig, K. ; Mavromatidis, G. ; Ruesch, F. ; Dorer, V. ; Evins, R.: A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015), S. 1391–1404. `http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123`. – DOI 10.1016/j.rser.2015.07.123

[Annex60 2022] Annex60: *Modelica Annex 60 library.* verfügbar unter: `https://www.iea-annex60.org/pubs.html`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Ast et al. 2012] Ast, M. ; Eckl, H. ; Elbracht, J. ; Fischer, K. ; Fritz, J. ; Henke-Jelit, S. ; Jensen, H. ; Pester, S. ; Sbresny, J.: *Leitfaden Erdwärmenutzung in Niedersachsen Rechtliche und technische Grundlagen – GeoBerichte 24.* 2012. – Herausgeber: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen

[Backhaus et al. 2021] Backhaus, K. H. ; Ehrhardt, H. ; Jacob, A. ; Petereit, L. ; Schreinermacher, B. ; Sperr, A. ; Tippelt, E. ; Weinmann, V.: Branchenstudie 2021: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen / Bundesverband Wärmepumpe. 2021. – Forschungsbericht

[Backhaus et al. 2023] Backhaus, K. H. ; Ehrhardt, H. ; Kersten, S. ; Moser, S. ; Richert, F. ; Rieger, I. ; Tippelt, E. ; Jacob, A. ; Otting, J. ; Schreinermacher, B.: Branchenstudie 2023: Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen / Bundesverband Wärmepumpe. 2023. – Forschungsbericht

[Bayerisches Landesamt für Umwelt 2022] Bayerisches Landesamt für Umwelt: *UmweltAtlas Bayern – Angewandte Geologie*. 2022. – `https://www.umweltatlas.bayern.de/mapapps/resources/apps/lfu_angewandte_geologie_ftz/index.html?lang=de&activeTool=locationInformationTool`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BDEW 2019] BDEW: Wie heizt Deutschland 2019? – BDEW-Studie zum Heizungsmarkt / BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. 2019. – Forschungsbericht

[BDEW 2023] BDEW: *Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland*. 2023. – `https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand/`, zuletzt abgerufen am 13.09.2023

[Bernardi et al. 2019] Bernardi, A. ; Badenes, B. ; Becherini, F. ; Benou, A ; Bobbo, S. ; Bertermann, D. ; Cadelano, G. ; Cardoso, L. ; Castelruiz, A. ; Choropanitis, J. ; Cicolin, F. ; Contini, S. ; Cucueteanu, D. ; Cultrera, M. ; Dalla Santa, G. ; De Carli, M. ; Emmi, G. ; Fedele, L. ; Galgaro, A. ; Gavriliuc, R. ; Graci, S. ; Karytsas, C. ; Magraner, T. ; Mendrinos, D. ; Mezzasalma, G. ; Müller, J. ; Noye, S. ; O'Neill, N. ; Pasquali, R. ; Pockelé, L. ; Poletto, F. ; Righini, D. ; Tarabotti, A. ; Urchueguía, J. ; Veughs, P. ; Zarrella, A.: *Cheap and efficient application of reliable ground source heat exchangers and pumps – Trainingshandbuch – Deutsche version*. https://cheap-gshp.eu/: Cheap-GSHPs, 2019

[BKI 2018] BKI: *Baukosten – Positionen Neubau – Teil 1: Statistische Kostenkennwerte für Gebäude*. BKI Kostenplanung, 2018. – ISBN 9783945649558

[BLOCON 2021] BLOCON: *EED – Frequently Asked Questions – Software within building physics and ground heat storage*, 2021. – `https://buildingphysics.com/download/eedfaq.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BLOCON 2022] BLOCON: *EED version 4 – Earth Energy Designer – Update manual – Software within building physics and ground heat storage*, 2022. – `https://www.buildingphysics.com/manuals/EED4.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BLU 2012] BLU: *Merkblatt Nr. 3.7/2 – Planung und Erstellung von Erdwärmesonden – Sole- oder wasserbetriebenen Erdwärmesonden für Wärmepumpenanlagen mit einer Heizleistung bis maximal 30 kW.* 2012. – Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLU)

[BMJ 2020a] BMJ: *Gesetz zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Zurverfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben (Geologiedatengesetz – GeolDG).* Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de, 2020. – GeoIDG vom 19. Juni 2020 ersetzt G 750-1 v. 4.12.1934 I 1223 (LagerstG) und V 750-1-1 v. 14.12.1934 I 1261 (LagerstGDV), `https://www.gesetze-im-internet.de/geoldg/GeolDG.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BMJ 2020b] BMJ: *Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).* Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de, 2020. – AwSV vom 18. April 2017, das zuletzt durch Artikel 256 der Verordnung vom 19. Juni 2020 geändert worden ist, `http://www.gesetze-im-internet.de/awsv/AwSV.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BMJ 2021a] BMJ: *Bundesberggesetz (BBergG).* Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de, 2021. – BBergG vom 13. August 1980, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1760) geändert worden ist, `https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BBergG.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BMJ 2021b] BMJ: *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG).* Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de, 2021. – WHG vom 31. Juli 2009, das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. August 2021 geändert worden ist, `https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/WHG.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BMJ 2022] BMJ: *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG).* Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de, 2022. – Ausfertigungsdatum: 08.08.2020, geändert am 20.07.2022, `https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf`, zuletzt abgerufen am 04.07.2023

[BMWK 2022] BMWK: *Abkommen von Paris.* 2022. – `https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BMWSB 2023] BMWSB ; Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.): *Entwurf eines Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz) – Gesetzgebungsverfahren 21.07.2023.* 2023. – `https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/kommunale-waermeplanung.html`, zuletzt abgerufen am 31.07.2023

[Bockelmann et al. 2011] Bockelmann, F. (Hrsg.) ; Fisch, N. (Hrsg.) ; Kipry, H. (Hrsg.): *Erdwärme für Bürogebäude nutzen.* Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., 2011 (BINE-Informationsdienst). – ISBN 9783816783251

[Bockelmann et al. 2021] Bockelmann, F. ; Peter, M. ; Roggenkamp, H.: WP_SOURCE – Versorgungskonzepte mit Wärmepumpen planen. In: *Der Geothermiekongress DGK*, 2021. – Essen, 01.-02. Dezember

[Bockelmann et al. 2019] Bockelmann, F. ; Peter, M. ; Schlosser, M.: future:heatpump: Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen: Abschlussbericht. 2019. – Forschungsbericht

[Bollinger u. Evins 2015] Bollinger, L. A. ; Evins, R.: HUES: A holistic urban energy simulation platform for effective model integration. In: *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale* LESO-PB, EPFL, 2015 (CONF), S. 841–846

[Born et al. 2022] Born, H. ; Bracke, R. ; Eicker, T. ; Rath, M. ; Fraunhofer IEG (Hrsg.): *Roadmap Oberflächennahe Geothermie – Erdwärmepumpen für die Energiewende – Potenziale, Hemmnisse und Handlungsempfehlungen.* 2022. – `https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/deutsch/dokumente/pressemitteilungen/Roadmap%20Oberfl%C3%A4chennahe%20Geothermie%20FhG%2009062022.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Born et al. 2017] Born, H. ; Schimpf-Willenbrink, S. ; Lange, H. ; Bussmann, G. ; Bracke, R.: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes – Bestandsaufnahme und Trends – 2. Aktualisierung der Studie. 2017. – Forschungsbericht. – Auftraggeber: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) für die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat)

[Böth 2021] Böth, T.: *Implementierung eines Tools mit grafischer Oberfläche zur Wärmepumpenauslegung.* Aachen, Germany, Feb 2021. – Masterarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[Bracke et al. 2015] Bracke, R. ; Rocholl, W. ; Schmidt, B. ; Bussmann, G. ; Eicker, T. ; Kelz, B.: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW: Teil 4 – Geothermie: LANUV-Fachbericht 40. 2015. – Forschungsbericht. – `https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40-Teil4-Geothermie_web.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Brandes et al. 2020] Brandes, J. ; Haun, M. ; Senkpiel, C. ; Kost, C. ; Bett, A. ; Henning, H. M.: WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM 2050 – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update unter einer Zielvorgabe von 65% CO2-Reduktion in 2030 und 100% in 2050 / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg). 2020. – Forschungsbericht

[Brauner 2019] Brauner, Günther: *Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung – Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050.* Wiesbaden : Springer Verlag GmbH, 2019. – ISBN 978–3–658–24853–6

[Bründlinger et al. 2018] Bründlinger, T. ; König, J. E. ; Frank, O. ; Gründig, D. ; Jugel, C. ; Kraft, P. ; Krieger, O. ; Mischinger, S. ; Prein, P. ; Seidl, H. ; Siegemund, S. ; Stolte, C. ; Teichmann, M. ; Willke, J. ; Wolke, M.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 – Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena), Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH) / Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). 2018. – Forschungsbericht

[BTOElt 1989] BTOElt: *Bundestarifordnung Elektrizität (BTOElt).* 1989. – Titel komplett oder überwiegend mit Ablauf des 30.06.2007 aufgehoben; `https://www.buzer.de/gesetz/395/index.htm`, zuletzt abgerufen am 04.08.2023

[Bucher et al. 2018] Bucher, A. ; Görke, J.-U. ; Vienken, T. ; Kolditz, O. ; Dietrich, P.: Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großlächiger Geothermiesysteme / Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fakultät für Maschinenbau und Energietechnik. 2018 (13FH059PX3). – Forschungsbericht

[Buderus 2022] Buderus: *Was ist die EVU-Sperre und was bedeutet sie?* 2022. – `https://www.buderus.de/de/waermepumpe/evu-sperre`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BUE 2012] BUE: *Leitfaden zur Erdwärmenutzung in Hamburg – Wärmegewinnung aus Erdwärmesonden und -kollektoren mit einer Heizleistung von max. 30 kW – Ein Leitfaden für Planer, Ingenieure und Bauherren.* 2012. – Herausgeber: Freie und Hansestadt Hamburg – Behörde für Umwelt und Energie

[Bundesregierung 2022] Bundesregierung: *Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“.* 2022. – https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_22112021_831200720200006.htm, zuletzt abgerufen am 06.09.2023

[BVG 2021] BVG: *Forschungslandschaft Geothermie – März 2021.* 2021. – Bundesverband Geothermie (BVG), https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Bibliothek/Downloads/Hintergrundpapiere/Forschungslandschaft_2021.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BVG 2022] BVG: *Mitteltiefe Geothermie.* 2022. – Bundesverband Geothermie (BVG), https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/m/mitteltiefe-geothermie.html, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BWP 2012] BWP: *Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern.* 2012. – in Zusammenarbeit mit Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit sowie Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

[BWP 2018] BWP: *Siedlungsprojekte und Quartierslösungen mit Wärmepumpe – Überblick, Anregungen, Referenzprojekte.* 2018. – https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpageflip/Broschuere_Siedlungen_Novelle_2018_web.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[BWP 2021] BWP ; Bundesverband Wärmepumpe (Hrsg.): *Roadmap Wärmepumpe – Der Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors.* 2021

[BWP 2023] BWP ; Bundesverband Wärmepumpe (Hrsg.): *Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 % gegenüber dem Vorjahr.* 2023. – https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/#content, zuletzt abgerufen am 07.08.2023

[Casasso u. Sethi 2014] Casasso, A. ; Sethi, R.: Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. In: *Renewable Energy* 62 (2014), S. 737–746. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.019. – DOI 10.1016/j.renene.2013.08.019

[Casasso u. Sethi 2016] Casasso, A. ; Sethi, R.: G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. In: *Energy* (2016), Nr. 106, S. 765–773. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091. – DOI 10.1016/j.energy.2016.03.091

[Cheap-GSHPs 2023] Cheap-GSHPs: *Cheap-GSHPs Decision Support Tool*. verfügbar unter: http://dss.cheap-gshp.eu/App, 2023. – zuletzt abgerufen am 18.07.2023

[D-ECA 2022] D-ECA: *District Energy Concept Adviser – Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere*. verfügbar unter: https://www.district-eca.de, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[De Rosa et al. 2015] De Rosa, M. ; Ruiz-Calvo, F. ; Corberán, J. M. ; Montagud, C. ; Tagliafico, L. A.: A novel TRNSYS type for short-term borehole heat exchanger simulation: B2G model. In: *Energy Conversion and Management* (2015), Nr. 100, S. 347–357. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.021. – DOI 10.1016/j.enconman.2015.05.021

[dena 2021] dena: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität / Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). 2021. – Forschungsbericht

[DHI-WASY 2013] DHI-WASY: *FEFLOW 6.2 – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System – User Manual*, 2013. – DHI-WASY Software, http://feflow.info/uploads/media/user_manual.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Diefenbach et al. 2020] Diefenbach, N. ; Loga, T. ; Born, R. ; Grossklos, M. ; Herbert, C.: Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand – Eine Untersuchung im Auftrag des Ingenieurbüros für energieeffiziente Gebäudetechnik VENTECS, Bremen. 2020. – Forschungsbericht. – https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/werkzeuge/2002_IWU_DiefenbachEtAl_Energetische-Kenngr%C3%B6%C3%9Fen-f%C3%BCr-Heizungsanlagen-im_Bestand.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Diersch 2014] Diersch, H. J. G.: *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer Science & Business Media, 2014. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5. – ISBN 978–3–642–38738–8

[Dimplex 2015] Dimplex: *Wärmepumpen für Heizen und Warmwasserbereitung – Projektierungs- und Installationshandbuch*. 2015. – Glen Dimplex Deutschland GmbH und Glen Dimplex Austria GmbH

[DIN 1988-200 2012] DIN 1988-200: *DIN 1988-200: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen – Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) – Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW.* Berlin, 2012. – Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN und Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN

[DIN EN 12831 2017] DIN EN 12831: *DIN EN 12831-1 – Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017.* Berlin, 2017. – DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS) und DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

[DIN EN 14511 2019a] DIN EN 14511: *DIN EN 14511-1: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 1: Begriffe; Deutsche Fassung EN 14511-1:2018.* Berlin, 2019. – DIN-Normenausschuss Kältetechnik (FNKä)

[DIN EN 14511 2019b] DIN EN 14511: *DIN EN 14511-2: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 2: Prüfbedingungen; Deutsche und Englische Fassung prEN 14511-2:2018.* Berlin, 2019. – DIN-Normenausschuss Kältetechnik (FNKä)

[DIN EN 15450 2007] DIN EN 15450: *DIN EN 15450 – Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen; Deutsche Fassung EN 15450:2007.* Berlin, 2007. – DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN

[DIN V 18599 2018a] DIN V 18599: *DIN V 18599-2 – Vornorm: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.* Berlin, 2018. – DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) und DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS)

[DIN V 18599 2018b] DIN V 18599: *DIN V 18599-5 – Vornorm: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen.* Berlin, 2018. – DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) und DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS)

[DIN V 18599 2018c] DIN V 18599: *DIN V 18599-8 – Vornorm: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf*

von Warmwasserbereitungssystemen. Berlin, 2018. – DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) und DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS)

[Dittrich et al. 2020] Dittrich, M. ; Dünnebeil, F. ; Köppen, S. ; von Oehsen, A. ; Vogt, R. ; Biemann, K. ; Fehrenbach, H. ; Ewers, B. ; Limberger, S. ; Gerhardt, N. ; Becker, S. ; Böttger, D. ; Frischmuth, F. ; Schoer, K.: Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenEe – Abschlussbericht / Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2020. – Forschungsbericht

[DoE 2022] DoE: *Modelica Buildings Library.* verfügbar unter: `https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[DVGW 2004] DVGW: *Technische Regel – Arbeitsblatt W 551 – Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Vermeidung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen.* Bonn, 2004

[Dymola 2022] Dymola: *Dymola – Systems Engineering – Multi-Engineering-Modellierung und -Simulation auf Basis von Modelica und FMI.* verfügbar unter: `https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[EBC 2022] EBC: *AixLib.* verfügbar unter: `https://github.com/RWTH-EBC/AixLib`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[EED 2022] EED: *EED – Earth Energy Designer.* verfügbar unter: `https://buildingphysics.com/eed-2/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Eggers 2018] Eggers, J.-B.: *DAS KOMMUNALE ENERGIESYSTEMMODELL KOMMOD – Konzeption, Implementierung und Anwendung an den Praxisbeispielen Frankfurt am Main und Freiburg-Haslach*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Diss., 2018

[Eicker et al. 2012] Eicker, U. ; Nouvel, R. ; Schulte, C. ; Schumacher, J. ; Coors, V.: 3D-Stadtmodelle für die Wärmebedarfberechnung. In: *Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 1–7

[Eicker u. Schumacher 2012] Eicker, U. ; Schumacher, J.: Simulation erneuerbarer Energiesysteme mit INSEL8. In: *Sonnenenergie* (2012), Nr. 3, S. 50–51

[Eisele et al. 2019a] Eisele, M. ; Hellstern, U. ; Holl, C. ; Hörmann, U. ; Jensen, H. ; Landgraf, C. ; Wagner, T.: *Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und -kollektoren.* 2019. – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), erarbeitet von der LAWA-Kleingruppe „Oberflächennahe Geothermie und Grundwasserschutz“ des Ständigen Ausschusses „Grundwasser und Wasserversorgung“ der LAWA, Fertigstellung: 12.10.2018, beschlossen auf der 157. LAWA-Vollversammlung am 03./04.04.2019 in Gotha

[Eisele et al. 2019b] Eisele, M. ; Rapp, C. ; Bergmann, S. ; Bierwagen, H. ; Dietz, T. ; Dümmer, M. ; Fragemann, H. J. ; Holzappel, B. ; Loheide, J. ; Leipertz, D. ; Müller, T. ; Kuhn, S. ; Lindberg, N. ; Resch, T. ; Schäfer, I. ; Thien, L. ; Weiss, E. G.: *Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme – LANUV-Arbeitsblatt 39.* 2019. – Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

[ELTRON 2017] ELTRON, STIEBEL: *Planung und Installation – Wärmepumpen.* 2017. – STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG

[ELTRON 2019] ELTRON, STIEBEL: *Planung und Installation – Wärmepumpen.* 2019. – STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG

[EnergyPlus 2022] EnergyPlus: *EnergyPlus.* verfügbar unter: `https://energyplus.net/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[EnWG 2005] EnWG: *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG) – §14a Netzorientierte Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen und steuerbaren Netzanschlüssen; Festlegungskompetenzen.* 2005. – zuletzt geändert durch Artikel 9 G. v. 26.07.2023; `https://www.buzer.de/EnWG.htm`, zuletzt abgerufen am 04.08.2023

[Epting et al. 2017a] Epting, J. ; García-Gil, A. ; Huggenberger, P. ; Vázquez-Suñe, E. ; Mueller, M. H.: Development of concepts for the management of thermal resources in urban areas – Assessment of transferability from the Basel (Switzerland) and Zaragoza (Spain) case studies. In: *Journal of hydrology* 548 (2017), S. 697–715. `http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.057`. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2017.03.057

[Epting u. Huggenberger 2013] Epting, J. ; Huggenberger, P.: Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state. In: *Journal of Hydrology* 501 (2013), S. 193–204. `http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.002`. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2013.08.002

[Epting et al. 2017b] Epting, J. ; Scheidler, S. ; Affolter, A. ; Borer, P. ; Mueller, M. H. ; Egli, L. ; García-Gil, A. ; Huggenberger, P.: The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources – A paradigmatic example. In: *Science of the Total Environment* 596–597 (2017), S. 87–96. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.296. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.03.296

[Erhorn-Kluttig et al. 2013] Erhorn-Kluttig, H. ; Erhorn, H. ; Weber, J. ; Wössner, S. ; Budde, E.: The District Energy Concept Adviser: A software tool to support urban decision makers in planning district energy supply schemes. In: *eceee Summer Study Proceedings*, 2013, S. 721–727

[Eskilson 1987] Eskilson, P.: *Thermal analysis of heat extraction boreholes.* Lund, Sweden, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Diss., 1987

[ETI 2009] ETI: *Nutzung von Erdwärme in Brandenburg – Heizen und Kühlen mit oberflächennaher Geothermie: Ein Leitfaden für Bauherren, Planer und Fachhandwerker.* 2009. – Herausgeber: Brandenburgische Energie Technologie Initiative (ETI)

[Eugster 2017] Eugster, W.: Analyse „Grenzabstände bei Erdwärmesonden“ – Bemerkungen zur Studie „Grenzabstände bei Erdwärmesonden“. 2017. – Forschungsbericht. – https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Bauen-2000-Watt/Grundlagen-Studienergebnisse/EGT/2017/Grenzabst%c3%a4nde_von_EWS.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Eyhusen 2019] Eyhusen, D.: *Auswahl einer Methode zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von bivalenten Wärmepumpensystemen in einem bestehenden Auslegungswerkzeug.* Aachen, Germany, Nov 2019. – Bachelorarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[FEFLOW 2022] FEFLOW: *FEFLOW.* verfügbar unter: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Fielding 2000] Fielding, R. T.: *Architectural styles and the design of network-based software architectures*, University of California, Irvine, Diss., 2000. – https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Fielding u. Reschke 2014] Fielding, R. T. ; Reschke, Julian F.: Hypertext transfer protocol (HTTP/1.1): Semantics and content. 2014. – Forschungsbericht. – https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7231, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Fisher u. Rees 2005] Fisher, D. E. ; Rees, S. J.: Modeling ground source heat pump systems in a building energy simulation program (EnergyPlus). In: *Ninth International IBPSA Conference*, 2005, S. 311–318

[Fraunhofer IWES/IBP 2017] Fraunhofer IWES/IBP: Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor / Studie im Auftrag von Agora Energiewende. 2017. – Forschungsbericht

[Fritsche u. Greß 2020] Fritsche, U. R. ; Gress, H. W.: Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050 – Bericht für die HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. 2020. – Forschungsbericht. – `https://iinas.org/app/uploads/2021/08/2020_KEV_THG_Strom-2019_2020-2050.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Fuchsluger et al. 2017] Fuchsluger, M. ; Götzel, G. ; Steiner, C. ; Weilbold, J. ; Rupprecht, D. ; Höfer-Öllinger, G. ; Kessler, T. ; Heimlich, K. ; Ponweiser, K. ; Nagler, J. ; Bothe, D. ; Biermayr, P. ; Haslinger, E. ; Plank, O. ; Strauss, A.: DEGENT-NET – Dezentrale geothermale Niedertemperatur-Wärmenetze in urbanen Gebieten. 2017. – Forschungsbericht

[García-Gil et al. 2020] García-Gil, A. ; Moreno, M. M. ; Schneider, E. G. ; Marazuela, M. A. ; Abesser, C. ; Mateo-Lázaro, J. ; Sánchez-Navarro, J. A.: Nested shallow geothermal systems. In: *Sustainability* 12 (2020), Nr. 12, S. 5152. `http://dx.doi.org/10.3390/su12125152`. – DOI 10.3390/su12125152

[García-Gil et al. 2015] García-Gil, A. ; Vazquez-Sune, E. ; Schneider, E. G. ; Sánchez-Navarro, J. A. ; Mateo-Lázaro, J.: Relaxation factor for geothermal use development – Criteria for a more fair and sustainable geothermal use of shallow energy resources. In: *Geothermics* 56 (2015), S. 128–137. `http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.04.003`. – DOI 10.1016/j.geothermics.2015.04.003

[Gatzka u. Kölling 2011] Gatzka, B. ; Kölling, M.: GeoT*SOL basic – Programm zur Auslegung und Simulation von Wärmepumpensystemen. In: *11. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Regensburg*, 2011

[GeoTsol 2021] GeoTsol: *GeoT*SOL – Testversion R3.* 2021. – Testversion genutzt am 30.06.2022

[Geyer et al. 2020] Geyer, B. ; Jorde, K. ; Kaltschmitt, M. ; Lewandowski, I. ; Norden, B. ; Streicher, W. ; Wiese, A.: Grundlagen des regenerativen Energieangebots. In: Kaltschmitt, M. (Hrsg.) ; Streicher, W. (Hrsg.) ; Wiese, A. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien – Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte*. Springer Verlag GmbH, 2020. – ISBN 978–3–662–61189–0, S. 59–191. – 6., vollständig neu überarbeitete Auflage

[Günther et al. 2014] Günther, D. ; Miara, M. ; Langner, R. ; Helmling, S. ; Wapler, J.: „WP Monitor“ – Feldmessung von Wärmepumpenanlagen / Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany. 2014. – Forschungsbericht

[Günther et al. 2020] Günther, D. ; Wapler, J. ; Langner, R. ; Helmling, S. ; Miara, M. ; Fischer, D. ; Zimmermann, D. ; Wolf, T. ; Wille-Hausmann, B.: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand", Abschlussbericht / Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany. 2020 (03ET1272A). – Forschungsbericht

[Häfner et al. 2015] Häfner, F. ; Wagner, R.-M. ; Meusel, L.: *Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen – Einführung mit praktischen Beispielen.* Springer Vieweg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 978–3–662–48200–1

[Haller et al. 2012] Haller, M. Y. ; Bertram, E. ; Dott, R. ; Afjei, T. ; Ochs, F. ; Hadorn, J. C.: Review of component models for the simulation of combined solar and heat pump heating systems. In: *Energy Procedia* 30 (2012), S. 611–622. `http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.071`. – DOI 10.1016/j.egypro.2012.11.071

[Hegger et al. 2015] Hegger, M. ; Dettmar, J. ; Meinberg, T. ; Drebes, C. ; Schulze, J. ; Sieber, S. ; Sylla, O.: UrbanReNet Phase II – EnEff:Stadt – UrbanReNet Phase 2: Weiterführung und inhaltliche Vertiefung des Forschungsprojektes UrbanReNet – Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum / TU Darmstadt. 2015 (0327832E). – Forschungsbericht

[Hein et al. 2016a] Hein, P. ; Kolditz, O. ; Görke, U. W. ; Bucher, A. ; Shao, H.: A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. In: *Applied Thermal Engineering* 100 (2016), S. 421–433. `http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.039`. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.039

[Hein et al. 2016b] Hein, P. ; Shao, H. ; Görke, U.-J. ; Vienken, T. ; Kolditz, O. ; Bucher, A.: Praxis und Datenlage zur Standortbewertung, Planung und Auslegung von Erdwärmesonden(systemen), gekoppelt mit Wärmepumpenanlagen – Studie und Anregungen des Forschungsprojekts Entwicklung von Methoden zur standortoptimierten geotechnischen Auslegung großflächiger Geothermiesysteme – SAGS / Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, TU Bergakademie Freiberg, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Technische Universität Dresden. 2016. – Forschungsbericht

[Hertle et al. 2014] Hertle, H. ; Jentsch, A. ; Eisenmann, L. ; Brasche, J. ; Brückner, S. ; Schmitt, C. ; Sager, C. ; Schurig, M.: Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO2-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050 / ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2014. – Forschungsbericht

[Hilgedieck et al. 2019] Hilgedieck, J. ; Magdowski, A. ; Christ, D. ; Janczik, S. ; Witt, J. ; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien weltweit – Globaler Stand 2018. In: *BWK – Das Energie-Fachmagazin* Bd. 71 (2019), Nr. 9

[Hirsch et al. 2019] Hirsch, H. ; Nicolai, A. ; Petzhold, H.: Co-Simulation Through Exchange of Time-Series Data Applied to an Energy System Model and Detailed Ground Heat Exchanger Model. In: *Proceedings of the 13th International Modelica Conference, March 4-6, Ostbayerische Technische Hoschschule Regensburg, Germany*, 2019, S. 525–531

[HLNUG 2022] HLNUG: *Geologie Viewer*. 2022. – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) `https://geologie.hessen.de`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[HOAI 2018] HOAI: *VOB – Vergabe- und vertragsOrdnung für Bauleistungen, BGB – Bauvertrag §§ 650a-v, HOAI – HonorarOrdnung für Architekten und Ingenieure*. 34. Auflage. München : Beck-Texte im dtv Verlagsgesellschaft, 2018. – ISBN 9783423055963

[Hochschule Biberach 2006] Hochschule Biberach: *GeoSyst – Auslegungswerkzeug Geothermie (Heizung/Kühlung) – Version 4.0*. 2006. – Zuletzt genutzt am 28.03.2022

[Hohberger et al. 2012] Hohberger, K. H. ; Kampf, J. ; Geiss, H. J.: *Leitfaden zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden – Grundwasserschutz — Standortbeurteilung – Wasserrechtliche Erlaubnis*. 2012. – Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz

[Holzheu 2021] Holzheu, Dr. S.: *Luft-Wasser-WP*. verfügbar unter: `https://holzheu.shinyapps.io/Luft-WP/`, 2021. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Hotmaps 2023] Hotmaps: *Hotmaps Toolbox*. verfügbar unter: `https://www.hotmaps.eu/map`, 2023. – zuletzt abgerufen am 18.07.2023

[Huber 2022] Huber: *EWS – ERDWÄRMESONDEN*. verfügbar unter Huber Energietechnik AG: `http://www.hetag.ch/ews.html`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Huber 2021] Huber, A.: *Benutzerhandbuch zum Programm EWS Version 5.4 – Berechnung von Erdwärmesonden*, 2021. – Huber Energietechnik AG, Ingenieur- und Planungsbüro, http://www.hetag.ch/download/Bed_EWS54.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Huchtemann 2015] Huchtemann, K.: *Supply temperature control concepts in heat pump heating systems.* Aachen, Germany, RWTH Aachen University, E. ON Energy Research Center, Diss., Mai 2015. – RWTH-2015-04987, ISBN 978-3-942789-30-1

[Häntze 2012] Häntze, T.: *Erdwärmenutzung in Sachsen-Anhalt Informationsbroschüre zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden.* 2012. – Herausgeber: Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt

[IBP 2018] IBP: MODER – Mobilization of innovative design tools for refurbishing of buildings at district level – D3.2 – Beta version of the extended District Energy Concept Adviser / Fraunhofer IBP. 2018 (680447). – Forschungsbericht

[IBPSA 2022] IBPSA: *Modelica IBPSA library.* verfügbar unter: https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[IDA 2022] IDA: *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE).* verfügbar unter: https://equa.se/de/ida-ice, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[IDEAS 2022] IDEAS: *IDEAS v3.0.0.* verfügbar unter: https://github.com/open-ideas/IDEAS, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[INSEL 2022] INSEL: *INSEL 8 :: Software zur Simulation, Überwachung und Visualisierung von Energiesystemen.* verfügbar unter: https://www.insel.eu/de/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Jochum et al. 2017] Jochum, P. ; Lempik, J. ; Böttcher, S. ; Stelter, D. ; Krenz, T. ; Mellwig, P. ; Pehnt, M. ; von Oehsen, A. ; Blömer, S. ; Hertle, H.: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich – Kurztitel: Anlagenpotenzial. 2017. – Forschungsbericht. – https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf, zuletzt abgerufen am 22.03.2022

[Kaltschmitt et al. 2020] Kaltschmitt, M. ; Sens, L. ; Streicher, W.: Einführung und Aufbau. In: Kaltschmitt, M. (Hrsg.) ; Streicher, W. (Hrsg.) ; Wiese, A. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien – Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte.* Springer Verlag GmbH, 2020. – ISBN 978–3–662–61189–0, S. 3–58. – 6., vollständig neu überarbeitete Auflage

[Karrer et al. 2020] Karrer, H. ; Hagel, K. ; Kirschbaum, A. ; Kötting, I. ; Kuckelkorn, J. M. ; Osgyan, P. ; Pendzich, L. ; Pinnekamp, M. ; Reuss, M. ; Streib, G. ; Bachseitz, M. ; Koenigsdorff, R. ; Van de Ven, A. ; Meier, S. ; Fuchs, H. ; Koch, F. ; Steger, H. ; Wilke, S. ; Schindler, L. ; Schüppler, S. ; Zorn, R. ; Lutz, T. ; Reduth, Y. ; Riegger, M. ; Rolker, J. ; Burkhardt, F.: Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II – Mit Beteiligung am IEA ECES Annes 27 – QEWS II / ZAE Bayern, KIT AGW, EIFER, Solites, HBC IGE, enOware GmbH, Burkhardt GmbH. 2020 (03ET1386A-G). – Forschungsbericht

[KEA-BW 2020] KEA-BW: *Kommunale Wärmeplanung – Handlungsleitfaden.* 2020. – Herausgeber: Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA)

[KEA-BW 2022] KEA-BW: *Klimaschutzgesetz § 7 c Kommunale Wärmeplanung.* 2022. – KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, `https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/klimaschutzgesetz-kommunale-waermeplanung`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[KEA-Niedersachsen 2019] KEA-Niedersachsen: *Leitfaden – Kommunale Wärmeplanung.* 2019. – Herausgeber: Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH

[Kill 2019] Kill, A.: *Auslegung von oberflächennahen geothermischen Anlagen bei Bestandsgebäuden.* Aachen, Germany, Feb 2019. – Bachelorarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[Kistemann 2017] Kistemann, T.: Hygienisch-mikrobiologische Trinkwassergüte in der Trinkwasser-Installation. In: Kistemann, T. (Hrsg.) ; Schulte, W. (Hrsg.) ; Rudat, K. (Hrsg.) ; Hentschel, W. (Hrsg.) ; Häussermann, D. (Hrsg.): *Gebäudetechnik für Trinkwasser – Fachgerecht planen — Rechtssicher ausschreiben — Nachhaltig sanieren.* Springer Verlag GmbH, 2017. – ISBN 978–3–662–54301–6, S. 9–66. – 2. Auflage

[Kistemann u. Bausch 2019] Kistemann, T. ; Bausch, K.: Prozessziel Trinkwassergüte. In: Treeck, C. van (Hrsg.) ; Kistemann, T. (Hrsg.) ; Schauer, C. (Hrsg.) ; Herkel, S. (Hrsg.) ; Elixmann, R. (Hrsg.): *Gebäudetechnik als Strukturgeber für Bau- und Betriebsprozesse – Trinkwassergüte – Energieeffizienz – Digitalisierung.* Springer Verlag GmbH, 2019. – ISBN 978–3–662–58156–8, S. 91–166

[Koenigsdorff 2011] Koenigsdorff, R.: *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung.* Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verl., 2011. – ISBN 9783816782711

[Koenigsdorff et al. 2004] Koenigsdorff, R. ; Heinrich, S. ; Köhler, A. ; Sedlak, M. ; Füssl, A.: Entwicklung eines Entscheidungs-und Auslegungswerkzeuges für die energieeffiziente Heizung und Kühlung durch bauteilintegrierte und geothermische Gebäudetemperierung. 2004. – Forschungsbericht

[Koenigsdorff u. Kirschmann 2007] Koenigsdorff, R. ; Kirschmann, C.: Erweiterung des Handrechenverfahrens GEO-HANDlight zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern auf die kombinierte Heizung und Kühlung. In: *Der Geothermiekongress 2007, Bochum, 29-31 Oktober 2007*, 2007, S. 82–84

[Koenigsdorff et al. 2007] Koenigsdorff, R. ; Köhler, A. ; Kirschmann, C.: GEO-HANDlight – Handrechenverfahren zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern. In: *7. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 25./26. April 2007, Freising. Regensburg: OTTI*, 2007, S. 97–101

[Koenigsdorff u. Van de Ven 2019] Koenigsdorff, R. ; Van de Ven, A.: Vereinfachte Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme – Version 3 & 4 des Programms GEO-HANDlight. In: *bbr – Leitungsbau/Brunnenbau/Geothermie* 12 (2019), S. 72–76

[Köhler et al. 2021] Köhler, B. ; Bürger, V. ; Weidinger, R. ; Doderer, H. ; Schäfer-Stradowsky, S. ; Tänzler, D.: *Ariadne-Analyse – Strategische kommunale Wärmeplanung*. 2021. – Herausgeber: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

[Koschwitz et al. 2016] Koschwitz, D. ; Brüntjen, A. ; Chivite, A. ; Frisch, J. ; van Treeck, C.: Softwaregestützte Wärmebedarfsermittlung bei Informations- und Ressourcenknappheit. In: *Tagungsband der 6. deutsch-österreichischen IBPSA Konferenz, BauSIM*, 2016, S. 691–696. – 14.-16. September 2016, Dresden, Germany

[Kummert u. Bernier 2008] Kummert, M. ; Bernier, M.: Sub-hourly simulation of residential ground coupled heat pump systems. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 29 (2008), Nr. 1, S. 27–44. http://dx.doi.org/10.1177/0143624407087286. – DOI 10.1177/0143624407087286

[Kuriyan u. Shah 2019] Kuriyan, K. ; Shah, N.: A combined spatial and technological model for the planning of district energy systems. In: *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* (2019), Nr. 21, S. 111–131. http://dx.doi.org/10.5278/ijsepm.2019.21.8. – DOI 10.5278/ijsepm.2019.21.8

[LEA 2022] LEA, LandesEnergieAgentur-Hessen: Nutzung von erneuerbaren Energien zum Heizen und Kühlen im Bestandsbau / Ernst & Young Real Estate GmbH; RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D. LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH, Januar 2022. – Forschungsbericht. – `https://www.lea-hessen.de/mediathek/publikationen/3718`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[LfULG 2014] LfULG: *Erdwärmesonden – Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie*. 2014. – Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

[LGRB 2022] LGRB: *Mitteltiefe Geothermie*. 2022. – Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Baden-Württemberg, `https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/geothermie/mitteltiefe-geothermie`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[LLUR 2011] LLUR: *Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes Erdwärmekollektoren – Erdwärmesonden – Empfehlungen für Planer, Ingenieure und Bauherren*. 2011. – Herausgeber: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)

[Löhmer 2020] Löhmer, M.: *Dimensionierung von Puffer- und Trinkwarmwasserspeichern für Systeme mit geothermisch betriebenen Wärmepumpen*. Aachen, Germany, Apr 2020. – Masterarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[Lorz u. van Treeck 2018] Lorz, C. ; van Treeck, C.: Modellvorhaben Effizienzhäuser Plus im Altbau Energetisches Monitoring der Effizienzhäuser Plus im Altbau Pfuhler Str. 4+6 und 12+14 in Neu-Ulm, Schlussbericht / RWTH Aachen University. Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), Dezember 2018 (10.08.81-13.01). – Forschungsbericht

[Maaß 2020] Maass, C.: Wärmeplanung: Grundlage einer neuen Fachplanung. In: *Zeitschrift für Umweltrecht (ZUR)* 1 (2020), S. 22–31. – `https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/07/Aufsatz_ZUR_2020_Grundlagen_einer_neuen_Waermeplanung.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Marti et al. 2009] Marti, J. ; Witzig, A. ; Huber, A. ; Ochs, M.: Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4 – Schlussbericht / Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Vela Solaris AG, Huber Energietechnik AG, September 2009. – Forschungsbericht

[MathWorks 2022] MathWorks: *Simulink – Gemacht für Model-Based Design*. verfügbar unter: `https://de.mathworks.com/products/simulink.html`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Mauch et al. 2010] Mauch, W. ; Corradini, R. ; Wiesemeyer, K. ; Schwentzek, M.: Allokationsmethoden für spezifische CO2-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. In: *ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN* 55.Jg. (2010), Nr. 9, S. 12–14. – `file:///C:/Users/SeWe/Downloads/ET_Allokationsmethoden_CO21.pdf`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Maurer et al. 2008] Maurer, M. ; Naumann, H. ; Becker, L. ; Streit, T.: *Leitfaden Erdwärmenutzung*. 2008. – Herausgeber: Ministerium für Umwelt Saarland

[Miara et al. 2011] Miara, M. ; Günther, D. ; Kramer, T. ; Oltersdorf, T. ; Wapler, J.: Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, Endbericht / Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany. 2011 (0327401A). – Forschungsbericht

[Michalzik 2013] Michalzik, D.: Mitteltiefe Geothermie – was ist das? In: *Geothermische Energie* 76 (2013), Nr. 2, S. 30–31

[Möbus 2002] Möbus, H.: Wärmepumpen-Berechnung. In: *Elektropraktiker* (2002), Nr. 56, S. 668–671

[Möbus 2006] Möbus, H.: Planungshilfe für Wärmepumpenheizungen. In: *Elektropraktiker* (2006), Nr. 60, S. 727–729

[Modelica 2022] Modelica: *Modelica Language*. Modelica Association; `https://modelica.org/modelicalanguage.html`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[ModHPS 2022] ModHPS: *ModHPS – Model for Heat Pump Systems*. frei verfügbar unter: `https://github.com/RWTH-E3D/ModHPS`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Müller et al. 2016] Müller, D. ; Lauster, M. ; Constantin, A. ; Fuchs, M. ; Remmen, P.: Aixlib – An open-source modelica library within the iea-ebc annex 60 framework. In: *BauSIM 2016* (2016), S. 3–9

[Nouvel et al. 2015] Nouvel, R. ; Brassel, K. H. ; Bruse, M. ; Duminil, E. ; Coors, V. ; Eicker, U. ; Robinson, D.: SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. In: *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale, September 9-11, Lausanne, Switzerland*, 2015, S. 889–894

[nPro 2022] nPro: *nPro – Das Planungstool für Quartiere*. verfügbar unter: `https://www.npro.energy/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[NRW 2022] NRW: *Geothermie in NRW – Standortcheck*. verfügbar unter Geologischer Dienst NRW: https://www.geothermie.nrw.de/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Ntimos u. Purshouse 2018] Ntimos, D. ; Purshouse, N.: Innovative Design Tools for Renovation at Building and District Level. In: *uSIM 2018*, 2018

[Obst et al. 2015] Obst, K. ; Iffland, J. ; Schwerdtfeger, B. ; Brandes, J.: *Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren in Mecklenburg-Vorpommern – Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes*. 2015. – Herausgeber: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern

[Pasler et al. 2011] Pasler, U. ; Reiner, A. ; Siegert, G. ; Wagner, T. ; Zepf, U. ; Zöllner, A.: *Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren*. 2011. – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Erarbeitet von der LAWA-Kleingruppe „Erdwärmepumpen des BLAK UmwS“ des Ständigen Ausschusses „Grundwasser“ 10.05.2011

[Pasquier et al. 2013] Pasquier, P. ; Marcotte, D. ; Bernier, M. ; Kummert, M.: Simulation of ground-coupled heat pump systems using a spectral approach. In: *Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambery, France*, 2013, S. 2691–2698

[Perego et al. 2022] Perego, R. ; Dalla Santa, G. ; Galgaro, A. ; Pera, S.: Intensive thermal exploitation from closed and open shallow geothermal systems at urban scale: unmanaged conflicts and potential synergies. In: *Geothermics* 103 (2022), S. 102417. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102417. – DOI 10.1016/j.geothermics.2022.102417

[Pezzutto et al. 2019] Pezzutto, S. ; Zambotti, S. ; Croce, S. ; Zambelli, P. ; Garegnani, G. ; Scaramuzzino, C. ; Pascuas, R. P. ; Zubaryeva, A. ; Haas, F. ; Exner, D. ; Müller, A. ; Hartner, T. M. F. M. Fleiter ; Klingler, A.-L. ; Kühnbach, M. ; Manz, P. ; Marwitz, S. ; Rehfeldt, M. ; Steinbach, J. ; Popovski, E. ; Kranzl, L. ; Fritz, S.: Hotmaps Project, D2.3 WP2 Report – Open Data Set for the EU28. 2019. – Forschungsbericht. – https://www.hotmaps-project.eu/wp-content/uploads/2018/03/D2.3-Hotmaps_for-upload_revised-final_.pdf, zuletzt abgerufen am 19.01.2023

[Pezzutto et al. 2022] Pezzutto, S. ; Zambotti, S. ; Croce, S. ; Zambelli, P. ; Garegnani, G. ; Scaramuzzino, C. ; Pascuas, R. P. ; Zubaryeva, A. ; Haas, F. ; Exner, D. ; Müller, A. ; Hartner, T. M. F. M. Fleiter ; Klingler, A.-L. ;

Kühnbach, M. ; Manz, P. ; Marwitz, S. ; Rehfeldt, M. ; Steinbach, J. ; Popovski, E. ; Kranzl, L. ; Fritz, S.: *potential_geothermal_raster*. frei verfügbar unter: https://gitlab.com/hotmaps/potential/potential_geothermal_raster, 2022. – zuletzt abgerufen am 19.01.2023

[Poppei et al. 2017] Poppei, J. ; Masset, O. ; Rau, B. ; Wagner, R. ; Kobler, R. ; Huber, A.: Grenzabstände bei Erdwärmesonden – Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen. 2017. – Forschungsbericht. – https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Bauen-2000-Watt/Grundlagen-Studienergebnisse/EGT/2017/Grenzabst%c3%a4nde_von_EWS.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Poppei et al. 2019] Poppei, J. ; Wagner, R. ; Huber, A. ; Bionda, D.: Strategische Planung von Erdwärmesonden. 2019. – Forschungsbericht. – http://www.hetag.ch/download/Strategische-EWS-Planung-AHB.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Prognos et al. 2020] Prognos ; Öko-Institut ; Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland / Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. 2020. – Forschungsbericht

[Prognos et al. 2021] Prognos ; Öko-Institut ; Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann – Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität / Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. 2021. – Forschungsbericht

[Remmen et al. 2017] Remmen, P. ; Lauster, M. ; Mans, M. ; Fuchs, M. ; Osterhage, T. ; Müller, D.: TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. In: *Journal of Building Performance Simulation* 11 (2017), Nr. 1, S. 84–98. http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539. – DOI 10.1080/19401493.2017.1283539

[Repenning et al. 2023] Repenning, J. ; Harthan, R. ; Blanck, R. ; Böttcher, H. ; Braungardt, S. ; Bürger, V. ; Cook, V. ; Emele, L. ; Göckeler, K. ; Görz, W. K. ; Hacker, F. ; Hennenberg, K. ; Jörss, W. ; Kasten, P. ; Kreye, K. ; Ludig, S. ; Matthes, F. C. ; Moosmann, L. ; Nissen, C. ; Reise, J. ; Scheffler, M. ; Schumacher, K. ; Wiegmann, K. ; Zerrahn, A. ; Brugger, H. ; Fleiter, T. ; Mandel, T. ; Rehfeldt, M. ; Rohde, C. ; Deurer, J. ; Steinbach, J.: Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 / Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2023. – Forschungsbericht. – Teilbericht im Rahmen des Projektes „THG-Projektionen: Politikszenarien für den Klimaschutz X“

[Rezaei et al. 2021] Rezaei, A. ; Samadzadegan, B. ; Rasoulian, H. ; Ranjbar, S. ; Samareh Abolhassani, S. ; Sanei, A. ; Eicker, U.: A new modeling approach for low-carbon district energy system planning. In: *Energies* 14 (2021), Nr. 5, S. 1383. http://dx.doi.org/10.3390/en14051383. – DOI 10.3390/en14051383

[Rogelj et al. 2019] Rogelj, J. ; Forster, P. M. ; Kriegler, E. ; Smith, C. J. ; Séférian, R.: Author Correction: Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. In: *Nature* (2019), Nr. 580, S. E4. http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2147-6. – DOI 10.1038/s41586–020–2147–6

[Rumohr 2017] Rumohr, S.: Anlagendimensionierung zur Unterschreitung des in Hessen für EWS geforderten Mindestabstandes zur Grundstücksgrenze. In: *bbr – Leitungsbau/Brunnenbau/Geothermie* 05 (2017), S. 58–65

[Rumohr et al. 2019] Rumohr, S. ; Hoffmann, M. ; Fechner, N. M.: *Erdwärmenutzung in Hessen – Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen – 6., überarbeitete Auflage*. 2019. – Herausgeber: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

[Ruschenburg et al. 2014] Ruschenburg, J. ; Ćutić, T ; Herkel, S.: Validation of a black-box heat pump simulation model by means of field test results from five installations. In: *Energy and buildings* 84 (2014), S. 506–515. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.014. – DOI 10.1016/j.enbuild.2014.08.014

[Sagerschnig et al. 2014] Sagerschnig, C. ; Arndt, D. ; Frey, M.: Aktuelle Softwareentwicklungen für die Planungspraxis: gekoppelte Simulationen für geothermische Nutzungen. In: *Tagungsband der 5. deutsch-österreichischen IBPSA Konferenz, BauSIM*, 2014, S. 308–313. – 22.–24. September 2014, Aachen, Germany

[Salvalai 2012] Salvalai, G.: Implementation and validation of simplified heat pump model in IDA-ICE energy simulation environment. In: *Energy and Buildings* 49 (2012), S. 132–141. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.038. – DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.038

[Samadzadegan et al. 2021] Samadzadegan, B. ; Samareh Abolhassani, S. ; Dabirian, S. ; Ranjbar, S. ; Rasoulian, H. ; Sanei, A. ; Eicker, U.: Novel energy system design workflow for zero-carbon energy district development. In: *Frontiers in Sustainable Cities* 3 (2021), S. 662822

[Schauer et al. 2019] Schauer, C. ; Fraass, M. ; Heinecke, O. ; Jäger, H. ; Köhler, H. ; Otto, C. ; Puls, P. N. S. N. Steger ; Witt, O. ; Zbocna, M.: Planung und Betrieb

4.0. In: Treeck, C. van (Hrsg.) ; Kistemann, T. (Hrsg.) ; Schauer, C. (Hrsg.) ; Herkel, S. (Hrsg.) ; Elixmann, R. (Hrsg.): *Gebäudetechnik als Strukturgeber für Bau- und Betriebsprozesse – Trinkwassergüte – Energieeffizienz – Digitalisierung*. Springer Verlag GmbH, 2019. – ISBN 978–3–662–58156–8, S. 167–276

[Siraganyan et al. 2019] Siraganyan, Karni ; Mauree, Dasaraden ; Robin, Damien ; Uhlhorn, Eva ; Scartezzini, Jean-Louis: Strategies to maximise the autonomy of neighbourhoods with the integration of renewable energies. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 1343 IOP Publishing, 2019, S. 012109

[Sophena 2022] Sophena: *SOPHENA – Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen*. verfügbar unter: `https://www.carmen-ev.de/service/sophena/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Spitler 2000] Spitler, J. D.: GLHEPRO – A design tool for commercial building ground loop heat exchangers. In: *Proceedings of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Québec. August 17-18*, 2000

[Sterchele et al. 2020] Sterchele, P. ; Brandes, J. ; Heilig, J. ; Wrede, D. ; Kost, C. ; Schlegl, T. ; Bett, A. ; Henning, H. M.: WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg). 2020. – Forschungsbericht

[Stickel et al. 2019] Stickel, M. ; Marx, S. ; Mayer, F. ; Fisch, M. N.: Simulation tool for planning smart urban districts in a sustainable energy supply – Integrating several sectors in high resolution. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 1343 IOP Publishing, 2019. – 012110

[STIEBEL 2022] STIEBEL: *Wärmepumpentool*. 2022. – Online-Wärmepumpentool von STIEBEL ELTRON, `https://www.stiebel-eltron.de/toolbox/waermepumpe/`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Striebel 2009] Striebel, D.: Speichersysteme. In: Striebel, Dieter (Hrsg.): *Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden – Komponenten, Systeme, Anlagenbeispiele*. Vieweg + Teubner, 2009. – ISBN 978–3–8348–0327–6, S. 87–100. – 1. Auflage

[SUBV 2022] SUBV: *Antrag auf Erlaubnis zur Errichtung einer Erdwärmegewinnungsanlage*. 2022. – Herausgeber: Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr – Referat 34 – Wasserbehörde

[THERMOS 2022] THERMOS: *THERMOS*. verfügbar unter: https://www.thermos-project.eu/home/, 2022. – zuletzt abgerufen am 18.07.2023

[Thomas et al. 2022] Thomas, S. ; Schüwer, D. ; Vondung, F. ; Wagner, O. ; Greenpeace e.V. im Auftrag v. (Hrsg.): *Heizen ohne Öl und Gas bis 2035 – Ein Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude*. 2022. – https://www.greenpeace.de/publikationen/Heizen%20ohne%20%C3%96l%20und%20Gas%20bis%202035.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Thommen et al. 2020] Thommen, J. P. ; Achleitner, A. K. ; Gilbert, D. U. ; Hachmeister, D. ; Jarchow, S. ; Kaiser, G.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. 9. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020, 2020. – ISBN 978–3–658–27245–6

[Thumim 2021] Thumim, J.: THERMOS – Thermal Energy Resource Modeling and Optimization System – Initial Application Design (Public Version) / Centre for Sustainable Energy. 2021. – Forschungsbericht. – THERMOS Deliverable D5.12

[TLW 2013] TLW: *Nutzung oberflächennaher Geothermie – Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung*. 2013. – Herausgeber: Thüringer Landesverwaltungsamt Referat 440 Wasserwirtschaft

[TRNSYS 2022] TRNSYS: *TRNSYS – Transient System Simulation Tool*. verfügbar unter: http://www.trnsys.com/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[UDK 2022] UDK: *BuildingSystems*. verfügbar unter: https://modelica-buildingsystems.de/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[UMBW 2005] UMBW: *Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden*. 2005. – Herausgeber: Umweltministerium Baden-Württemberg

[UMBWL 2018] UMBWL: *Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)*. 2018. – Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

[Umweltbundesamt 2023a] Umweltbundesamt: *Erneuerbare Energien in Zahlen*. 2023. – https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick, zuletzt abgerufen am 07.08.2023

[Umweltbundesamt 2023b] Umweltbundesamt: *UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent*. 2023. – https://www.umweltbundesamt.de/presse/

pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um, zuletzt abgerufen am 02.08.2023

[UVK 2019] UVK: *Erdwärmenutzung in Berlin – Merkblatt Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten*. 2019. – Herausgeber: Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin

[Valentin 2022] Valentin: *GeoT*Sol – Die Berechnungs- und Simulationssoftware für Wärmepumpenanlagen*. verfügbar unter Valentin-Software: https://valentin-software.com/produkte/geotsol/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Van de Ven et al. 2021a] Van de Ven, A. ; Koenigsdorff, R. ; Bayer, P.: Enhanced Steady-State Solution of the Infinite Moving Line Source Model for the Thermal Design of Grouted Borehole Heat Exchangers with Groundwater Advection. In: *Geosciences* (2021), Nr. 11, 410. http://dx.doi.org/10.3390/geosciences11100410. – DOI 10.3390/geosciences11100410

[Van de Ven et al. 2021b] Van de Ven, A. ; Koenigsdorff, R. ; Neth, F. ; Burkhardt, F. ; Zorn, R. ; Schindler, L. ; Huttenloch, P. ; Nienborg, B. ; Hauri, F ; Kühl, J. U. ; Steger, H. ; Theophil, T. ; Reduth, Y. ; Karrer, H. ; Kuckelkorn, J. M. ; Staudacher, L. ; Pinnekamp, M.: Das Verbundvorhaben QEWSplus – Qualitätssicherung oberflächennaher Geothermiesysteme. In: *Der Geothermiekongress 2021, Essen, 01.-02. Dezember 2021*, 2021

[van Kempen 2022] van Kempen, H.: *Weiterentwicklung eines Web-Frontends zur Wärmepumpenkonfiguration*. Aachen, Germany, Apr 2022. – Masterarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[van Treeck 2016] van Treeck, C.: Building Information Modeling. In: van Treeck, C. (Hrsg.) ; Elixmann, R. (Hrsg.) ; Rudat, K. (Hrsg.) ; Hiller, S. (Hrsg.) ; Herkel, S. (Hrsg.) ; Berger, M. (Hrsg.): *Gebäude. Technik. Digital. – Building Information Modeling – BIM – Recht – Trinkwasser – Energiekonzepte – Brandschut*. Springer Verlag GmbH, 2016. – ISBN 978–3–662–52824–2, S. 13–92

[van Treeck et al. 2020] van Treeck, C. ; Frisch, J. ; Weck-Ponten, S. ; Fichter, E. ; Ziegler, M. ; Düber, S. ; Derksen, J. ; Juarez, O. ; Blankenbach, J. ; Becker, R. ; Laska, M. ; Hein, N.: GeTIS – Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene, Schlussbericht / RWTH Aachen University. Version: Juni 2020. http://dx.doi.org/10.2314/KXP:1738225658. Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB), Lehrstuhl für

Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia), Juni 2020 (03ET1357A). – Forschungsbericht

[van Treeck et al. 2019] van Treeck, C. ; Heidemann, A. ; Siwiecki, J. ; Schmidt, P. ; Zeppenfeldt, U.: Integrale Planung BIM– Umsetzungserfahrungen im Projekt „Viega World“. In: van Treeck, C. (Hrsg.) ; Kistemann, T. (Hrsg.) ; Schauer, C. (Hrsg.) ; Herkel, S. (Hrsg.) ; Elixmann, R. (Hrsg.): *Gebäudetechnik als Strukturgeber für Bau- und Betriebsprozesse – Trinkwassergüte – Energieeffizienz – Digitalisierung*. Springer Verlag GmbH, 2019. – ISBN 978–3–662–58156–8, S. 7–90

[VBI 2012] VBI, Verband Beratender Ingenieure: *VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Band 18. Aufl. Schriftenreihe der VBI, Verband Beratender Ingenieure, 2012

[VDI 2067 2012] VDI 2067: *VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen- Grundlagen und Kostenberechnung*. 2012. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 2078 2015] VDI 2078: *VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. 2015. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 4640 2019] VDI 4640: *VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. 2019. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 4640 2021] VDI 4640: *VDI 4640 Blatt 1 – Entwurf: Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. 2021. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 4645 2018] VDI 4645: *VDI 4645: Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern – Planung, Errichtung, Betrieb*. 2018. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 4650 2019] VDI 4650: *VDI 4650 Blatt 1: Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen – Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung*. 2019. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 4650 2020] VDI 4650: *VDI 4650 Blatt 1 Berichtigung: Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen – Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung*. 2020. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[VDI 6025 2012] VDI 6025: *VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen*. 2012. – Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie

[Vela Solaris AG] Vela Solaris AG: *Wirtschaftlichkeitsberechnung in Polysun*. – `https://www.youtube.com/watch?v=RxoAbY_gHYk`, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Vela Solaris AG 2018] Vela Solaris AG: *polysun®simulation software – Benutzerhandbuch*. www.velasolaris.com: Vela Solaris AG, 2018

[Velasolaris 2022] Velasolaris: *POLYSUN – Energiesystemsimulationen mit Präzision*. verfügbar unter: `https://www.velasolaris.com/software/`, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Viessmann 2011] Viessmann: *Planungshandbuch Wärmepumpen*. 2011. – Viessmann Deutschland GmbH, D 09/2011

[Walker-Hertkorn u. Kuntz 2021] Walker-Hertkorn, S. ; Kuntz, D.: Bewertung von geothermischen Anlagenteilen im Hinblick auf die AwSV-Vorgaben. In: *bbr – Leitungsbau/Brunnenbau/Geothermie* 07/08 (2021), S. 48–53

[Weck-Ponten 2017] Weck-Ponten, S.: *Praxisnahes Planungstool zur Auslegung geothermischer Systeme auf Gebüude- und Stadtquartiersebene*. 2017. – Konferenzbeitrag, 5. VDI Fachtagung: Energiesysteme und Energieversorgung für Gebüude, Quartiere und Industrieanlagen, Köln, 25.10.2017

[Weck-Ponten et al. 2018a] Weck-Ponten, S. ; Becker, R: ; Herle, S. ; Blankenbach, J. ; Frisch, J. ; van Treeck, C.: Automatisierte Datenaggregation zur Einbindung einer dynamischen Gebäudesimulation in ein Geoinformationssystem. In: *Tagungsband der 7. deutsch-österreichischen IBPSA Konferenz, BauSIM*, 2018, S. 516–523. – 26.-28. September 2018, Karlsruhe, Germany

[Weck-Ponten et al. 2021a] Weck-Ponten, S. ; Eyhusen, D. ; Frisch, J. ; van Treeck, C.: Systemkonfigurator zur Dimensionierung mono- und bivalenter Wärmepumpen: Teil 1: Systemkonfigurator und Eingabeparameter. In: *HLH-VDI Fachmedien* 72 (2021), Nr. 01-02, S. 42–46. `http://dx.doi.org/10.37544/1436-5103-2021-01-02-42`. – DOI 10.37544/1436–5103–2021–01–02–42

[Weck-Ponten et al. 2021b] Weck-Ponten, S. ; Eyhusen, D. ; Frisch, J. ; van Treeck, C.: Systemkonfigurator zur Dimensionierung mono- und bivalenter Wärmepumpen: Teil 2: Parameterstudien und Ergebnisse. In: *HLH-VDI Fachmedien* 72 (2021), Nr. 3, S. 45–49. `http://dx.doi.org/10.37544/1436-5103-2021-03-45`. – DOI 10.37544/1436–5103–2021–03–45

[Weck-Ponten et al. 2018b] Weck-Ponten, S. ; Fichter, E. ; Düber, S.: Geothermisches Informationssystem zur Auslegung, Bewertung und Genehmigung geothermischer Anlagen. In: *Der Geothermiekongress DGK*, 2018. – Essen, 27.-29. November, https://www.der-geothermiekongress.de/fileadmin/user_upload/DGK/DGK_2018/Tagungsband/F1.2_Weck-Ponten_et_al._DGK2018.pdf, zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[Weck-Ponten et al. 2022] Weck-Ponten, S. ; Frisch, J. ; van Treeck, C.: Simplified heat pump system model integrated in a tool chain for digitally and simulation-based planning shallow geothermal systems. In: *Geothermics* 106 (2022), 102579. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102579. – DOI 10.1016/j.geothermics.2022.102579. – ISSN 0375–6505

[Weiler et al. 2019] Weiler, V. ; Stave, J. ; Eicker, U.: Renewable energy generation scenarios using 3D urban modeling tools – Methodology for heat pump and co-generation systems with case study application. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 3, S. 403. http://dx.doi.org/10.3390/en12030403. – DOI 10.3390/en12030403

[Welsch et al. 2017] Welsch, B. ; Rühaak, W. ; Schulte, D. O. ; Formhals, J. ; Bär, K. ; Sass, I.: Co-Simulation geothermal applications and HVAC systems. In: *Energy Procedia* (2017), Nr. 125, S. 345–352. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.040. – DOI 10.1016/j.egypro.2017.08.040. – European Geosciences Union General Assembly 2017, EGU Division Energy, Resources & Environment, ERE

[Weser 2021] Weser, J.: *Entwicklung einer Web Applikation zur Wärmepumpendimensionierung.* Aachen, Germany, Aug 2021. – Bachelorarbeit, betreut von Sebastian Weck-Ponten

[Wetter u. Afjei 1996] Wetter, M. ; Afjei, T.: TRNSYS TYPE 401 – Kompressionswärmepumpe inklusiv Frost- und Taktverluste / Zentralschweizerisches Technikum Luzern, letzte Aktualisierung. 1996. – Forschungsbericht

[Wirtz 2023] Wirtz, M.: nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. In: *Energy* (2023), Nr. 268, S. 126575. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2022.126575. – DOI 10.1016/j.energy.2022.126575

[WPsoft 2022] WPsoft: *WP-OPT.* verfügbar unter WPsoft GmbH: http://www.wp-opt.de/, 2022. – zuletzt abgerufen am 23.12.2022

[WPSoft 2022] WPSoft: *WP-OPT – Calculation and Optimization of Heat Pump Systems – Demo version.* 2022. – Version 4.2.8.0, zuletzt genutzt am 04.07.2022

[Zosseder et al. 2018] Zosseder, K. ; Emge, J. ; Vaccaro, R. ; Zambelli, P.: Integration der oberflächennahen Geothermie in Energiepläne – Es gibt noch viel zu tun! In: *Geothermische Energie* 89 (2018), S. 20–21

Anhang A.

Stand der Technik

Tab. A.1.: Sonstige Randbedingungen und Abstandsempfehlungen der Bundesländer, der VDI 4640-1 und LAWA

Bundesland / Literaturquelle	Sonstige Abstände und Randbedingungen
Baden-Württemberg [UMBW, 2005; UMBWL, 2018]	–
Bayern [BLU, 2012]	> 0,7 m zu Ver- und Entsorgungsleitungen
Berlin [UVK, 2019]	< 30 kW; 1 m zu Ver-und Entsorgungsleitungen; 2 m zu Gebäuden
Brandenburg [ETI, 2009]	1 m zu Gebäuden
Bremen [SUBV, 2022]	0,5 m zu öffentlichen Straßenverkehrsflächen
Hamburg [BUE, 2012]	Ein- und Zweifamilienhäuser < 30 kW; 3 m zu Fernwärmeleitungen und Anlagen zur Lagerung wassergefährdender Stoffe; 2 m zu Gebäuden
Hessen [Rumohr et al., 2019]	< 30 kW
Mecklenburg-Vorpommern [Obst et al., 2015]	–
Niedersachsen [Ast et al., 2012]	< 30 kW
Nordrhein-Westfalen [Eisele et al., 2019b]	–
Rheinland-Pfalz [Hohberger et al., 2012]	–
Saarland [Maurer et al., 2008]	3 m zu Abwasseranlagen, Fernwärmeleitungen oder Anlagen mit wassergefährdenden Stoffen; 2 m zu Gebäuden
Sachsen [LfULG, 2014]	–
Sachsen-Anhalt [Häntze, 2012]	0,7 m zu Ver- und Entsorgungsleitungen
Schleswig-Holstein [LLUR, 2011]	–
Thüringen [TLW, 2013]	–
[VDI 4640, 2021]	1 m zu Ver-und Entsorgungsleitungen; 2 m zu Gebäuden
[Pasler et al., 2011]	–
[Eisele et al., 2019a]	–

Anhang B.

Gebäudeberechnungen

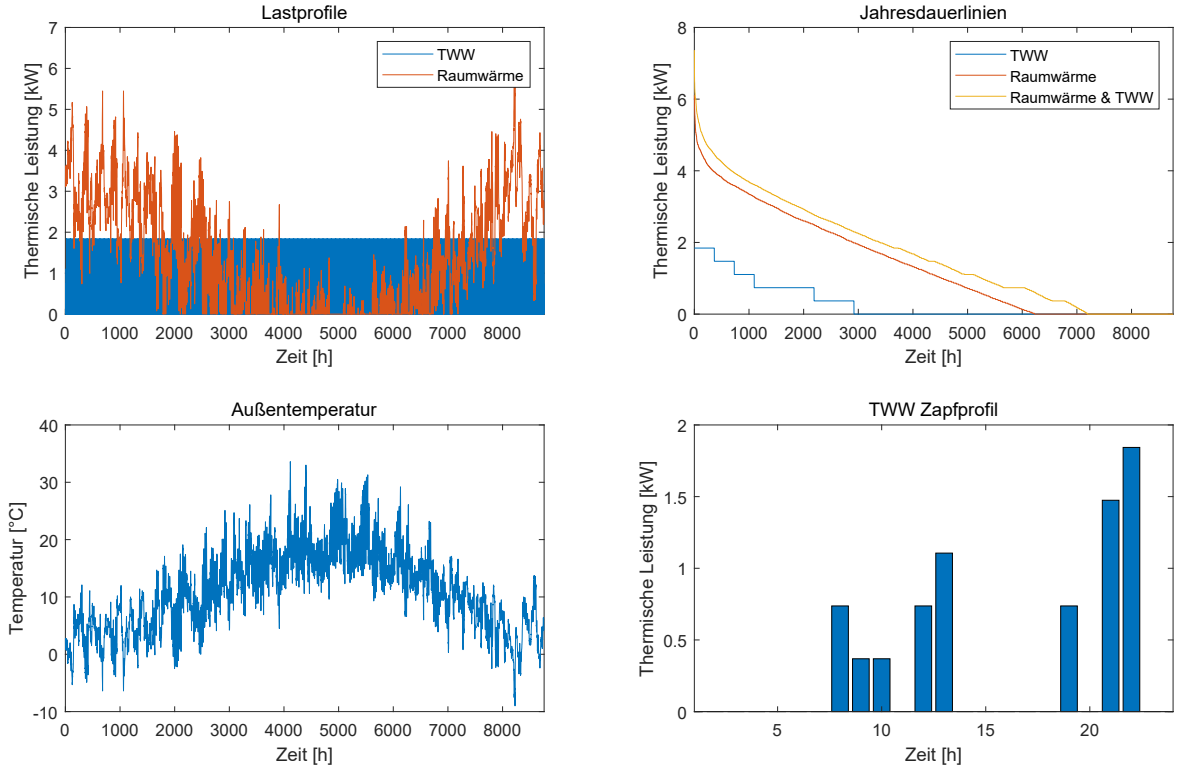


Abb. B.1.: Beispielhaftes Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 1): Lastkurven für Raumwärme und TWW (oben links); Außentemperaturverlauf (unten links); geordnete Jahresdauerlinien für Raumwärme, TWW sowie die summierte Kurve für Raumwärme und TWW (oben rechts); thermisches Tageszapfprofil für die TWE (unten rechts); [van Treeck et al., 2020]

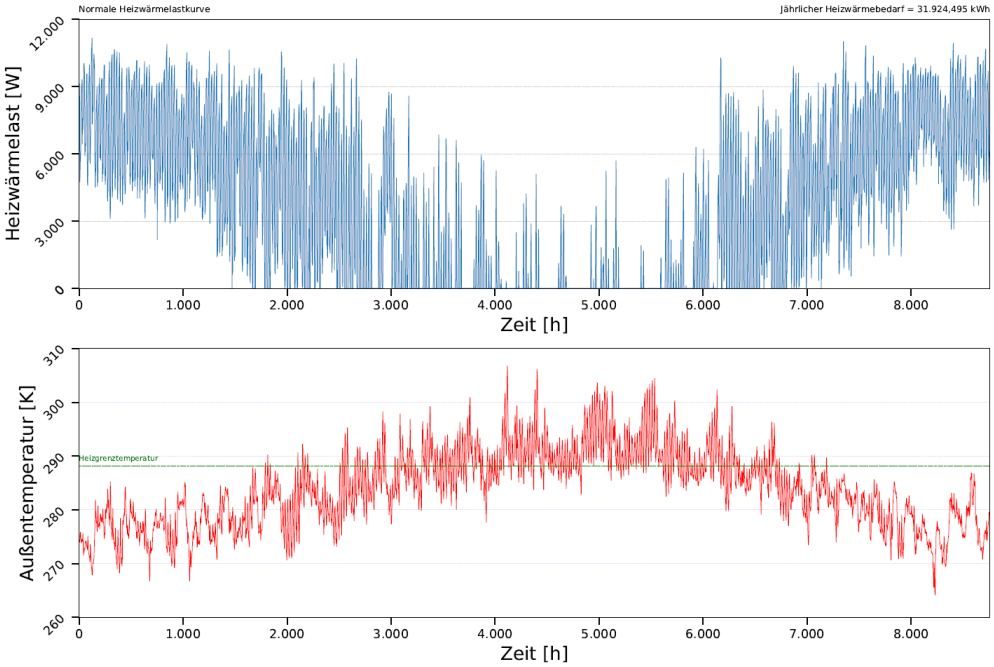


Abb. B.2.: Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 2) – Lastkurve für Raumwärme (oben) sowie Außentemperaturverlauf und Heizgrenztemperatur (unten) [van Treeck et al., 2020]

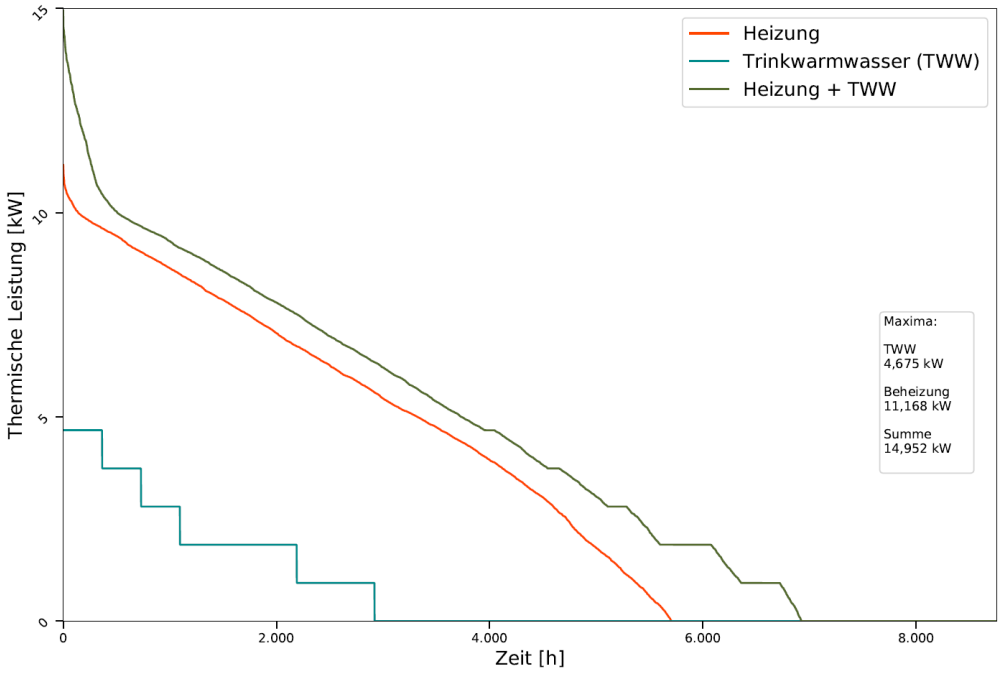
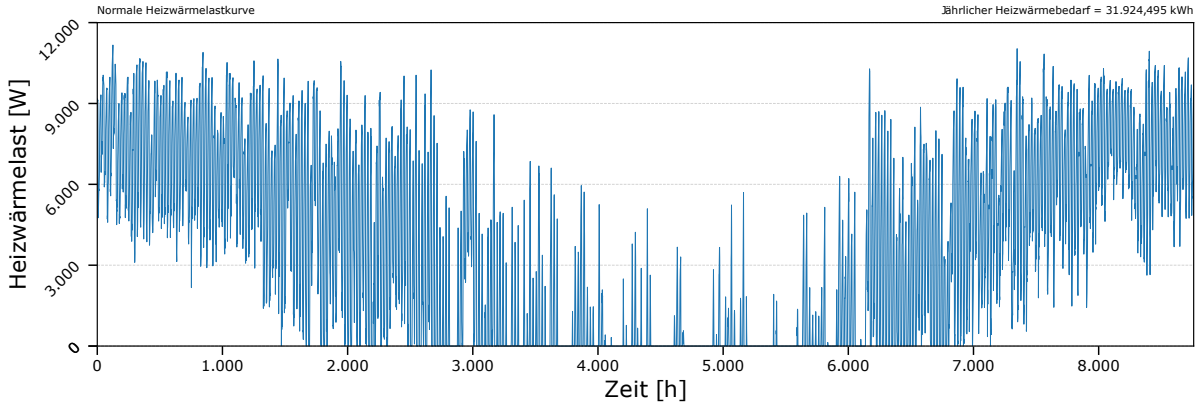
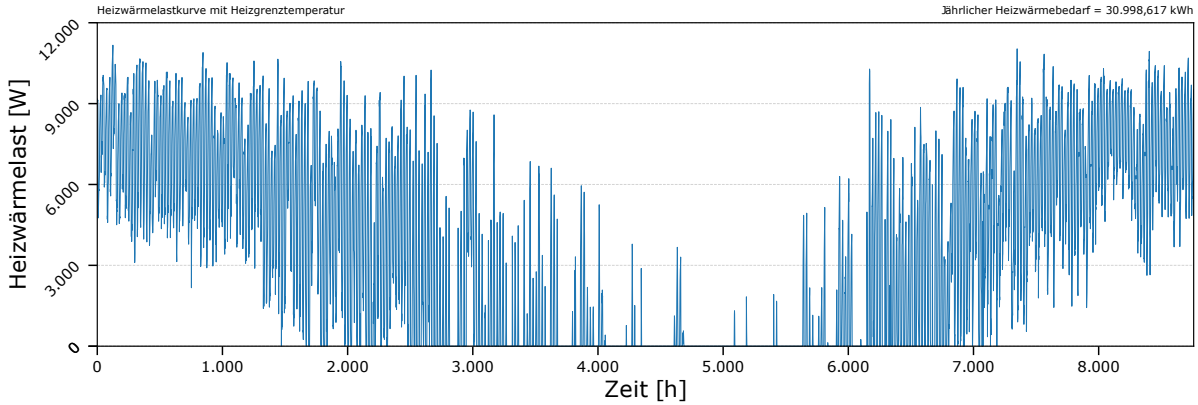


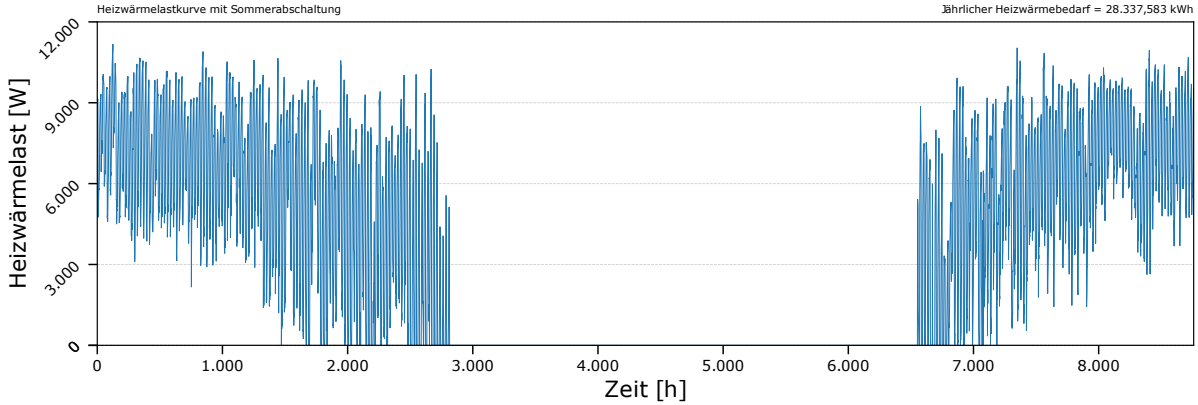
Abb. B.3.: Ergebnis-PDF des Berechnungsprozesses 2) – Jahresdauerlinie [van Treeck et al., 2020]



(a)



(b)



(c)

Abb. B.4.: Gegenüberstellung der Heizwärmelastkurven des Beispielgebäudes: a) Unbearbeitet; b) Berücksichtigung der Heizgrenztemperatur; c) Sommerabschaltung

Anhang C.

Wärmepumpenmodell

C.1. Eingangsparameter

Tab. C.1.: Notwendige Eingangsparameter von ModHPS

Parameter	Datenherkunft
Zeitschrittweite	Systemkonfigurator
Betriebsweise der Wärmepumpe	Systemkonfigurator
Einsatzbereich der Wärmepumpe	Systemkonfigurator
Herstellerleistungskennlinien	Herstellerdatenblätter
Anzahl angebundener Erdwärmesonden	Geoportal
Soleaustrittstemperatur	Untergrundmodell
Anzahl angebundener Gebäude	Geoportal
Gebäudelastkurven	Gebäudeberechnungswerkzeuge
Art der Heizwärmelastkurve	Geoportal
Solevolumenstrom der Wärmepumpe	Herstellerdatenblätter
Volumetrische Wärmekapazität des Wärmequellenfluids	Geoportal
Bereitschaftswärmeaufwände	Herstellerdatenblätter
Speichervolumina	Herstellerdatenblätter
Systemvorlauftemperaturen	Systemkonfigurator
Maximale Speichertemperaturen	Systemkonfigurator
Minimale Speichertemperaturen	Systemkonfigurator
Speicherhysterese	Systemkonfigurator
Sperrzeit	Systemkonfigurator
Art des gekoppelten Untergrundmodells	Systemkonfigurator

Tab. C.2.: Notwendige Eingangsparameter von ModHPS inklusive Beschreibungen

Parameter	Datenherkunft	Beschreibung
Zeitschrittweite	Systemkonfigurator	Zeitschrittweite von ModHPS.
Betriebsweise der Wärmepumpe	Systemkonfigurator	Monovalent, monoenergetisch, bivalent alternativ, bivalent parallel oder bivalent teil-parallel.
Einsatzbereich der Wärmepumpe	Systemkonfigurator	Kombination aus Heizen, TWE und Kühlen.
Herstellerleistungskennlinien	Herstellerdatenblätter	Wärmeleistung und elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Soleaustrittstemperatur für verschiedene Temperaturstufen.
Anzahl angebundener Erdwärmesonden	Geoportal	Anzahl der Erdwärmesonden, die der Wärmepumpe zugeordnet sind.
Soleaustrittstemperatur	Untergrundmodell	Soleaustrittstemperatur in jedem Untergrundzeitschritt.
Anzahl angebundener Gebäude	Geoportal	Anzahl der Gebäude, die der Wärmepumpe zugeordnet sind.
Gebäudelastkurven	Gebäudeberechnungswerkzeuge	Stundengenaue Lastkurven für Heizung und TWW sowie für Kühlung (nur bei Einsatzbereich mit Kühlen).
Art der Heizwärmelastkurve	Geoportal	Normal, Heizgrenze oder Sommerabschaltung.
Solevolumenstrom der Wärmepumpe	Herstellerdatenblätter	Konstanter Volumenstrom der Wärmequelle.
Volumetrische Wärmekapazität des Wärmequellenfluids	Geoportal	Produkt aus Dichte und spezifischer Wärmekapazität der Sole.
Bereitschaftswärmeaufwände	Herstellerdatenblätter	Konstante Wärmeverluste von Puffer- bzw. TWW-Speichern.
Speichervolumina	Herstellerdatenblätter	Volumina von Puffer- bzw. TWW-Speichern.
Systemvorlauftemperaturen	Systemkonfigurator	Nennvorlauftemperaturen für Heizung und TWW.
Maximale Speichertemperaturen	Systemkonfigurator	Maximale Regelsollwerttemperatur von Puffer- und TWW-Speicher.
Minimale Speichertemperaturen	Systemkonfigurator	Minimale Regelsollwerttemperatur von Puffer- und TWW-Speicher.
Speicherhysterese	Systemkonfigurator	Temperaturdifferenz für die Speicherregelung.
Sperrzeit	Systemkonfigurator	Sperrzeit am Stück, in der die Wärmepumpe aufgrund eines Wärmepumpenstromtarifs vom Stromversorger extern abgeschaltet ist.

Tab. C.3.: Weitere Eingangsparameter von ModHPS

Parameter	Datenherkunft	Beschreibung
Verdichterbetriebsweise der Wärmepumpe	Geoportal	Taktend oder leistungsgeregelt. Momentan ist nur der taktende Betrieb implementiert.
Kritische Bodenzelltemperatur	Geoportal	Minimale Bodentemperatur, ab der die Wärmepumpe ausgeschaltet werden soll. Nur bei Kopplung an numerisches Untergrundmodell relevant.
Minimale Bodenzelltemperatur	Numerisches Untergrundmodell	Minimum der Zelltemperaturen der angrenzenden Zellen jeder angebundenen Erdwärmesonde in jedem Untergrundzeitschritt. Nur bei Kopplung an numerisches Untergrundmodell relevant.
Art der Kühlung	Systemkonfigurator	Aktive oder passive Kühlung. Momentan ist nur passive Kühlung implementiert. Nur bei Betriebsweise mit Kühlen relevant.
Solevolumenstrom bei passiver Kühlung	Systemkonfigurator	Konstanter Solevolumenstrom bei passiver Kühlung.
Maximale Soleaustrittstemperatur bei passiver Kühlung	Systemkonfigurator	Temperaturgrenze bis zu der angenommen wird, dass alle Kühllasten durch passive Kühlung gedeckt werden können.
Tagessperrzeiten	Systemkonfigurator	Tageszeiten der Sperrzeitenstarts, in der die Wärmepumpe aufgrund eines Wärmepumpenstromtarifs vom Stromversorger extern abgeschaltet ist. Nur bei Sperrzeiten relevant.
Überbrückung der Sperrzeiten durch den zweiten Wärmeerzeuger	Systemkonfigurator	Eingabe, ob der zweite Wärmeerzeuger während der Sperrzeiten arbeiten kann. Nur bei bivalenten Betriebsweisen und Sperrzeiten relevant.
Nennleistung des zweiten Wärmeerzeugers	Systemkonfigurator	Nennleistung des zweiten Wärmeerzeugers. Nur bei bivalenten Betriebsweisen relevant.
Abschaltpunkt	Systemkonfigurator	Abschaltleistung der Wärmepumpe im teilparallelen Betrieb.
Kaskadenfaktor	Systemkonfigurator	Jede Wärmepumpe innerhalb einer Kaskade wird über den prozentualen Anteil an der Gesamtleistung dargestellt.
Leistung der externen Solepumpe	Systemkonfigurator	Zusätzliche Solepumpenleistung, die für die Berechnung der JAZ herangezogen werden kann.

C.2. Modus

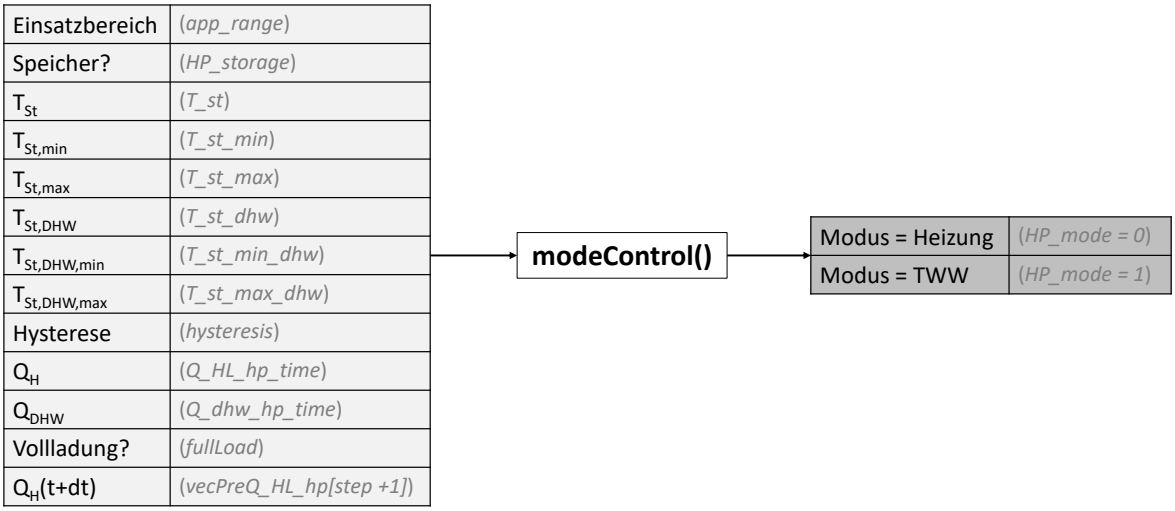


Abb. C.1.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *modeControl*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

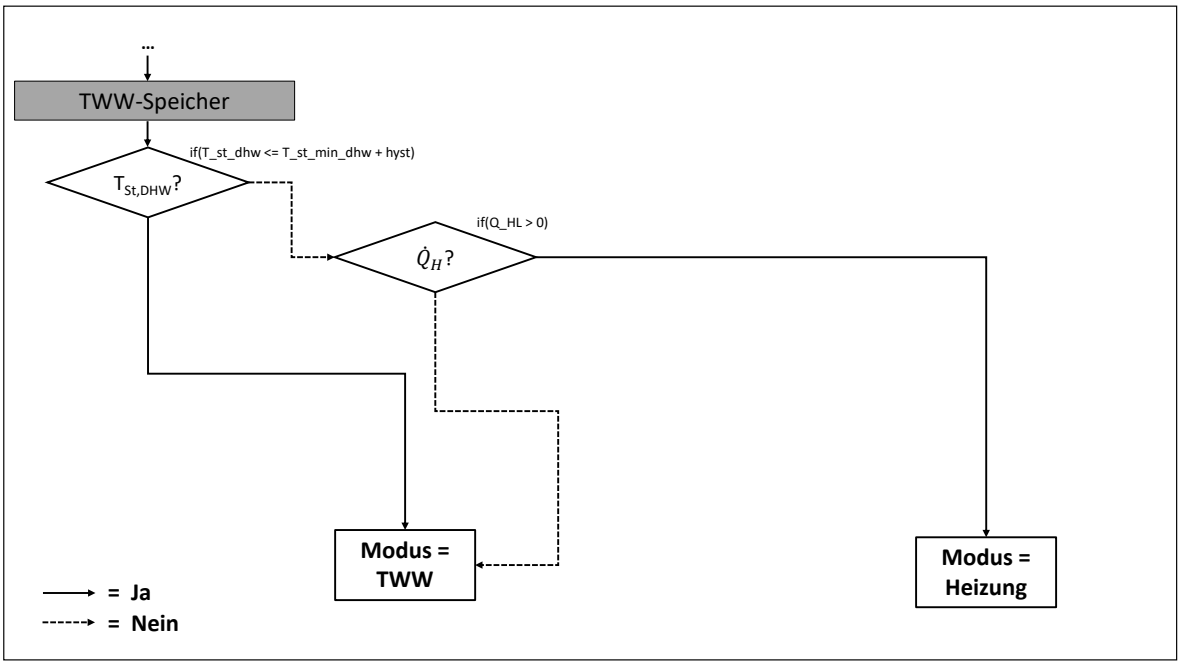


Abb. C.2.: Fortführung der Regelungsstruktur des Modus bei alleinigem TWW-Speicher

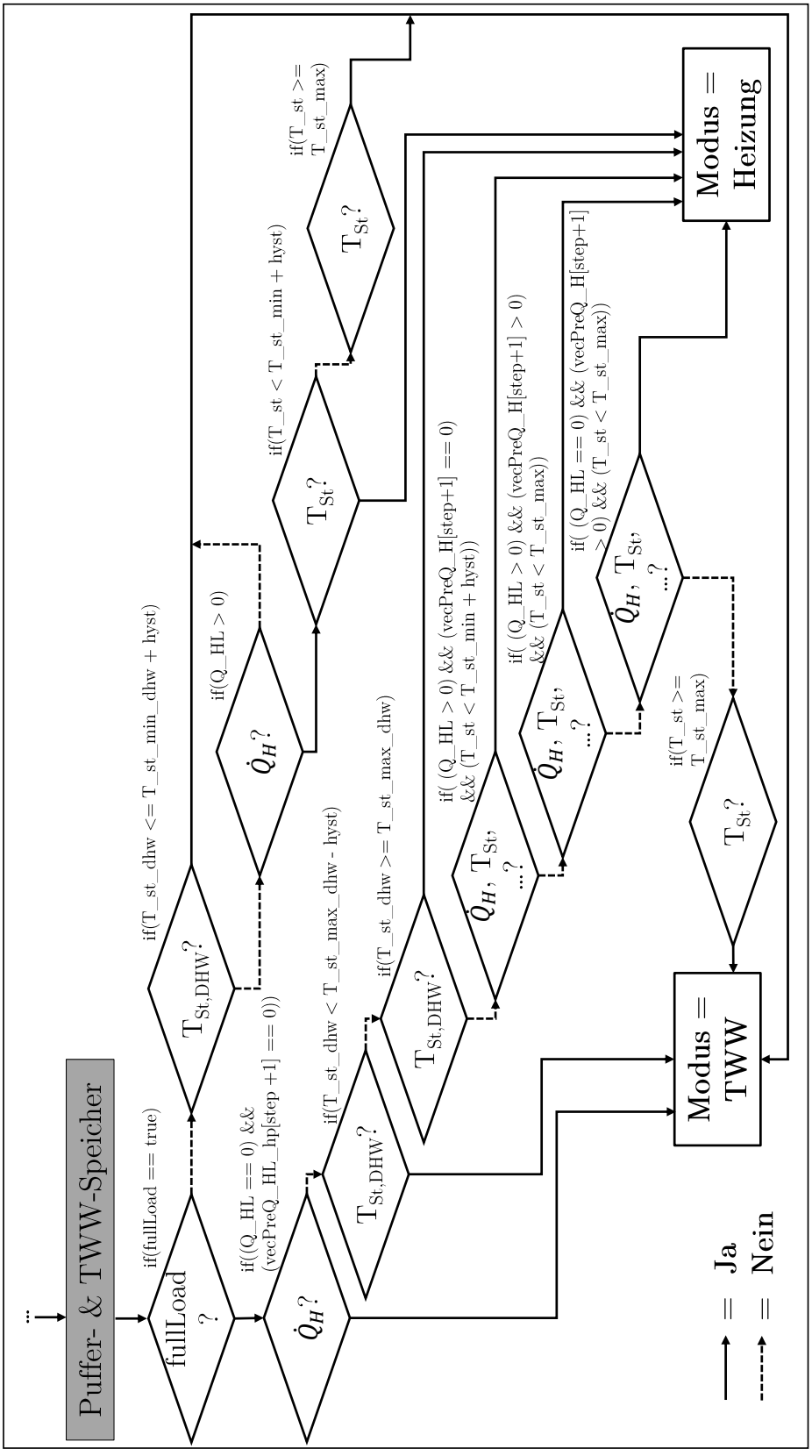


Abb. C.3.: Fortführung der Regelungsstruktur des Modus bei Puffer- und TWW-Speichern

C.3. Vollladung und Sperrzeit

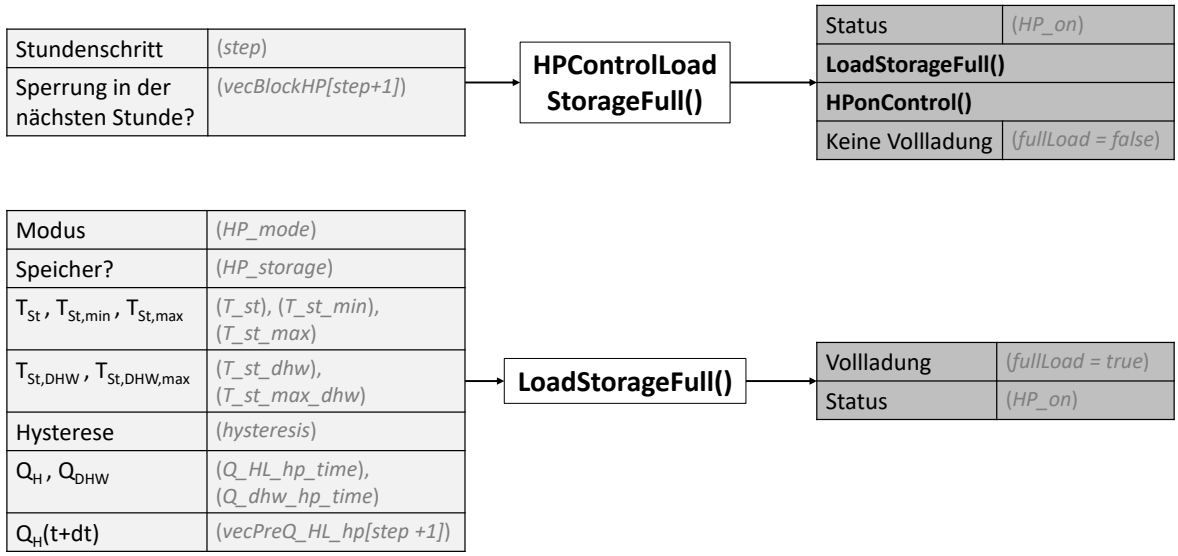


Abb. C.4.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *HPControlLoadStorageFull-* und *LoadStorageFull*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

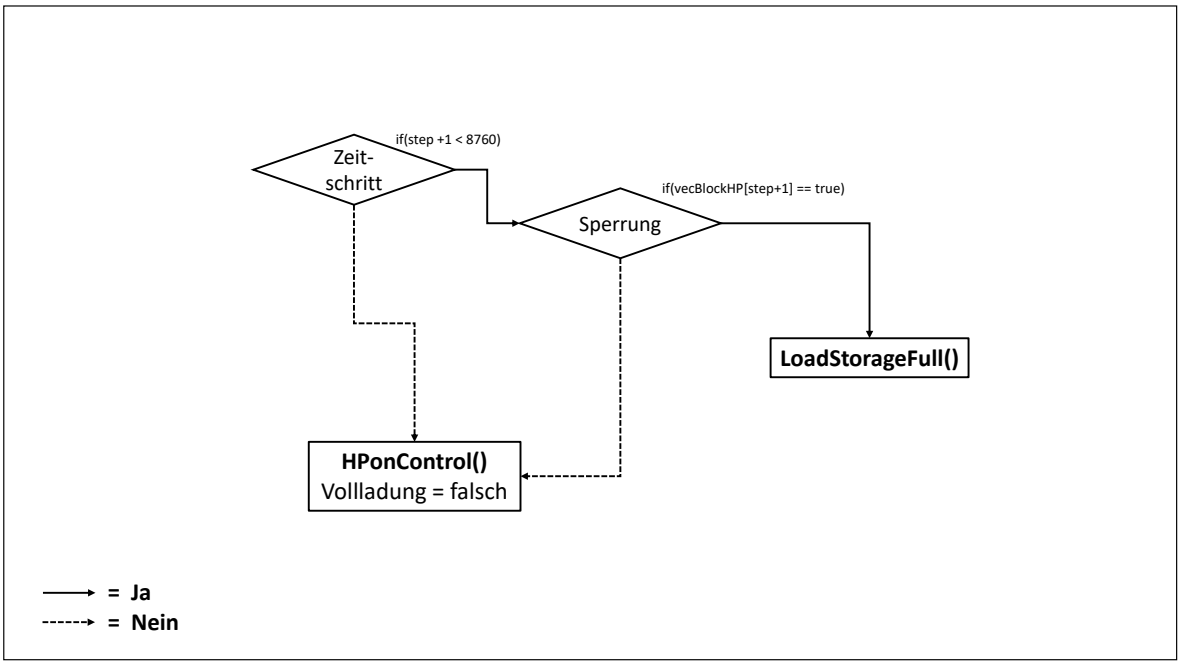


Abb. C.5.: Regelungsstruktur für die Vollladung der Speicher (*HPControlLoadStorageFull()*)

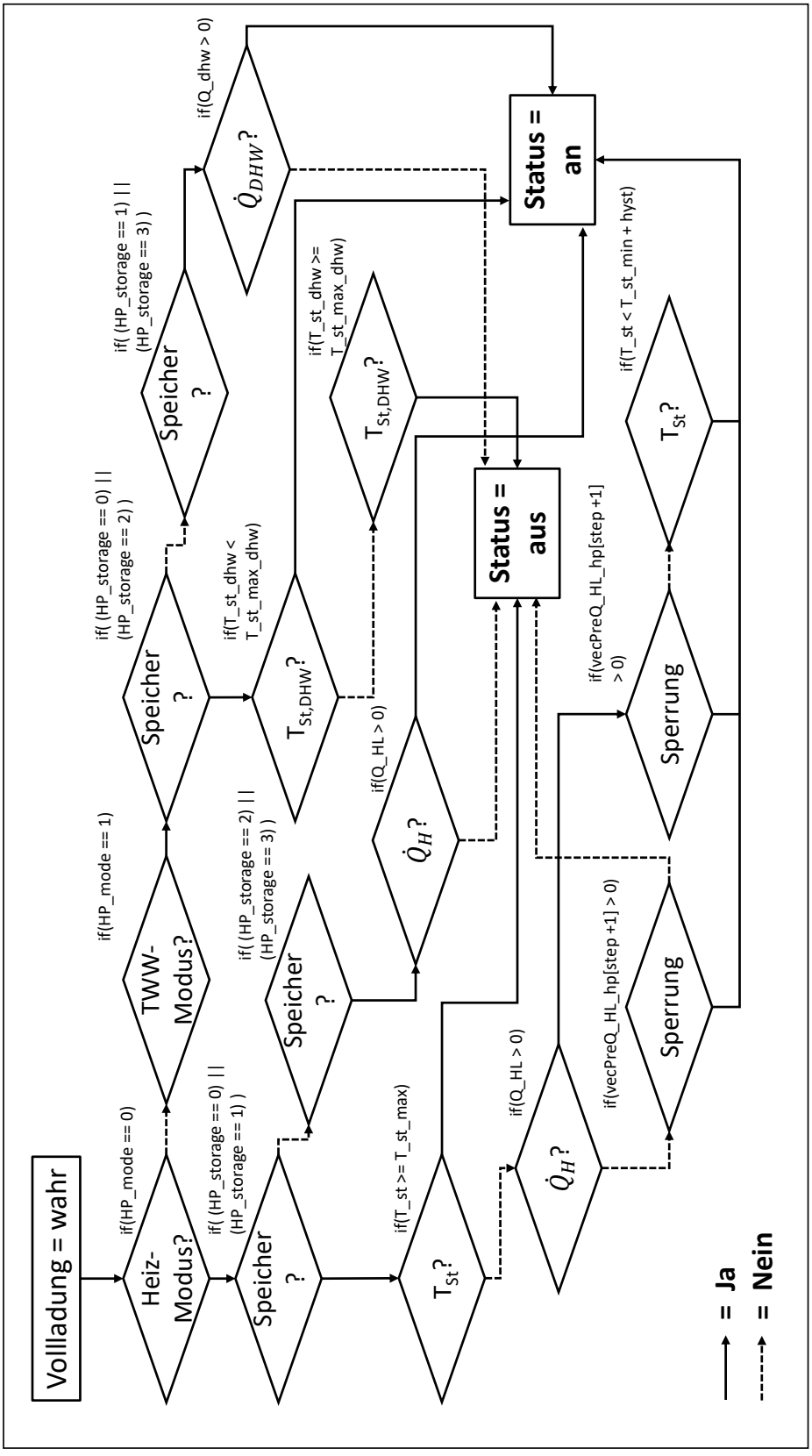


Abb. C.6.: Regelungsstruktur der *LoadStorageFull*-Funktion

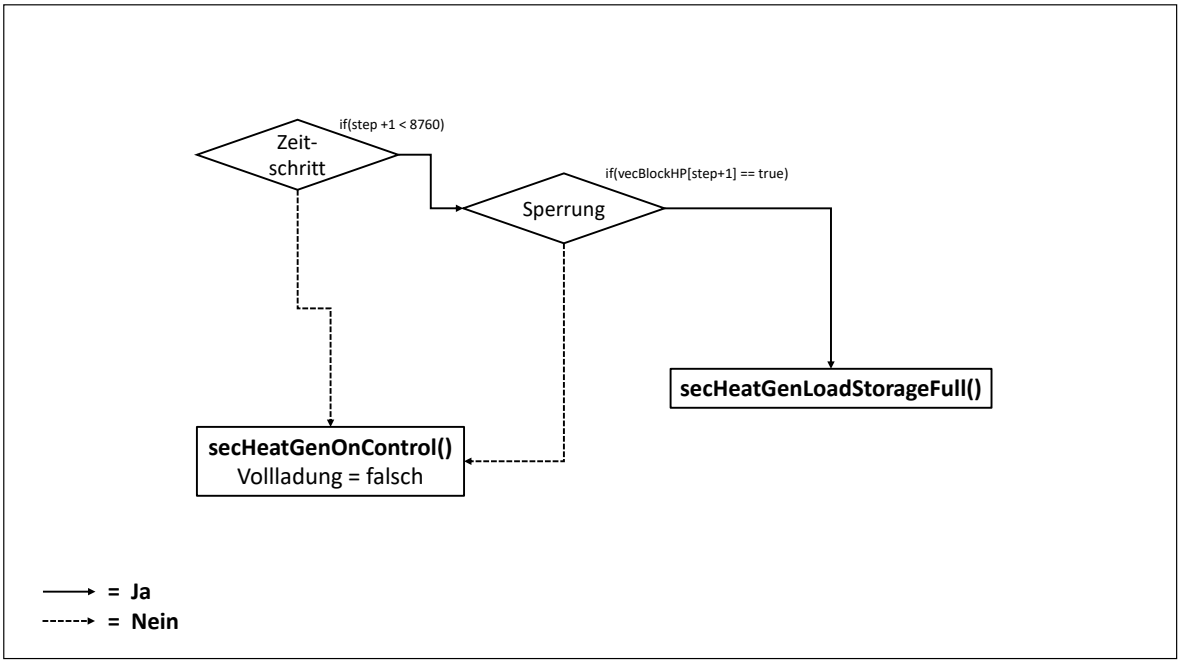


Abb. C.7.: Regelungsstruktur der Speichervollladung vor Sperrzeiten durch den zweiten Wärmeerzeuger im teilparallelen und im alternativen Betrieb

Sperrzeit am Stück	(*blockingTime*)
Jahresvektor der Stunden mit Sperrzeitenbeginn	(*vecBlockHP[step]*)
Zeitschritt des WPM	(*dt_comm*)

→ **blockingHP()** →

Sperrung der WP	(*blockHP*)

Abb. C.8.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *blockingHP*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

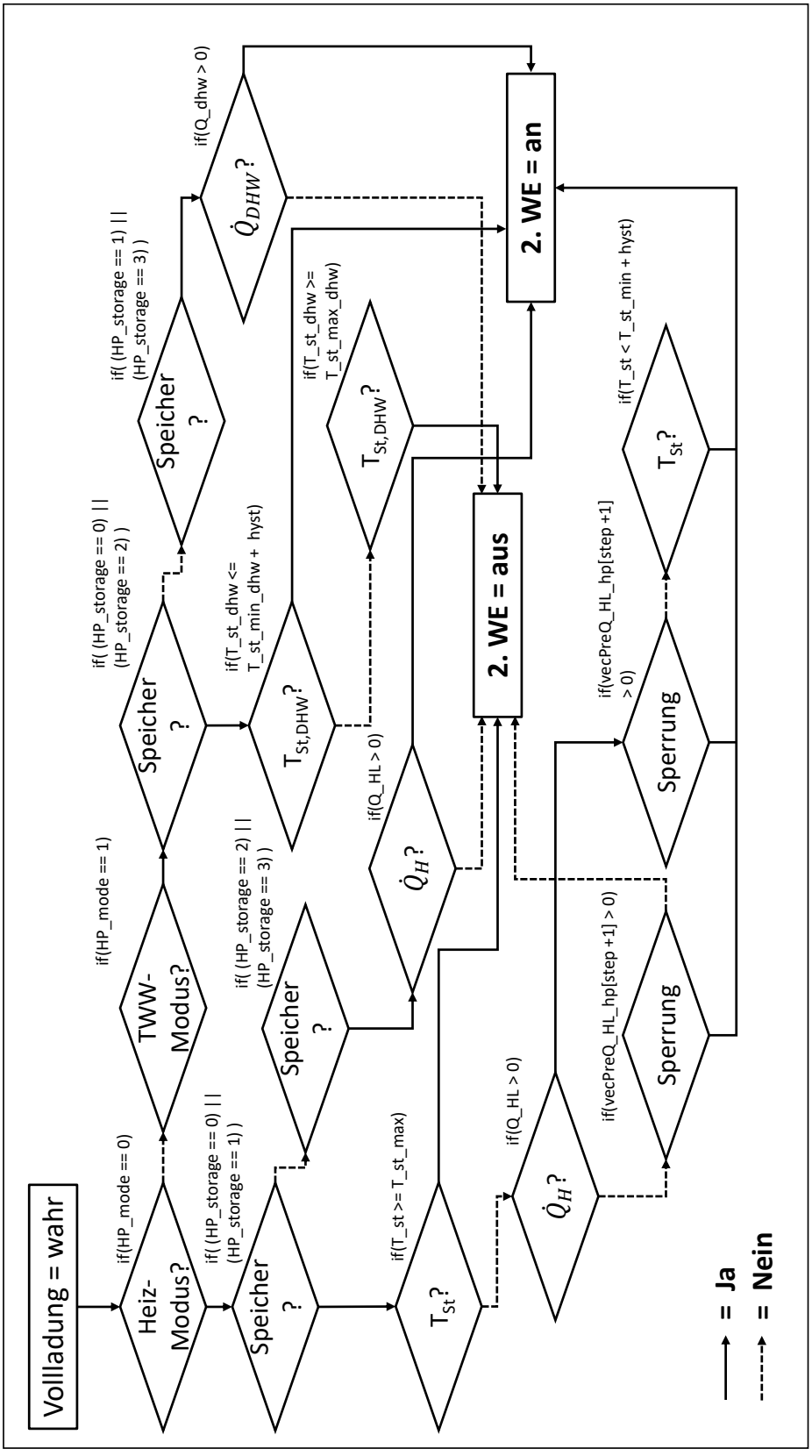


Abb. C.9.: Regelungsstruktur *secHeatGenLoadStorageFull*-Funktion

C.4. Interpolation

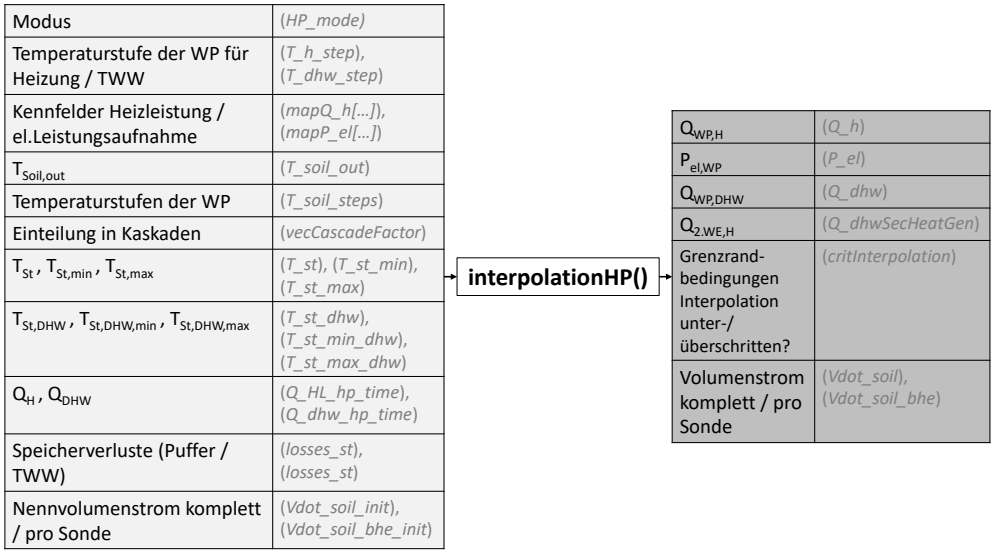


Abb. C.10.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *InterpolationHP*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

C.5. Logik, Ein- und Ausgabeparameter der Regelungsalgorithmen

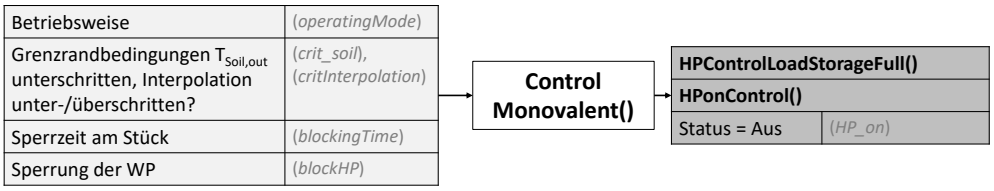


Abb. C.11.: Eingangsdaten und Ergebnisse der Regelungsstrategie der monovalenten Betriebsweise (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

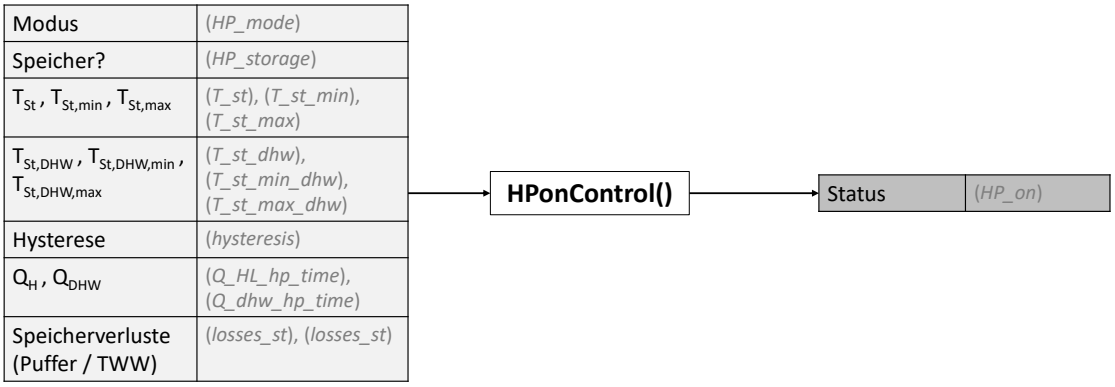


Abb. C.12.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *HPonControl*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

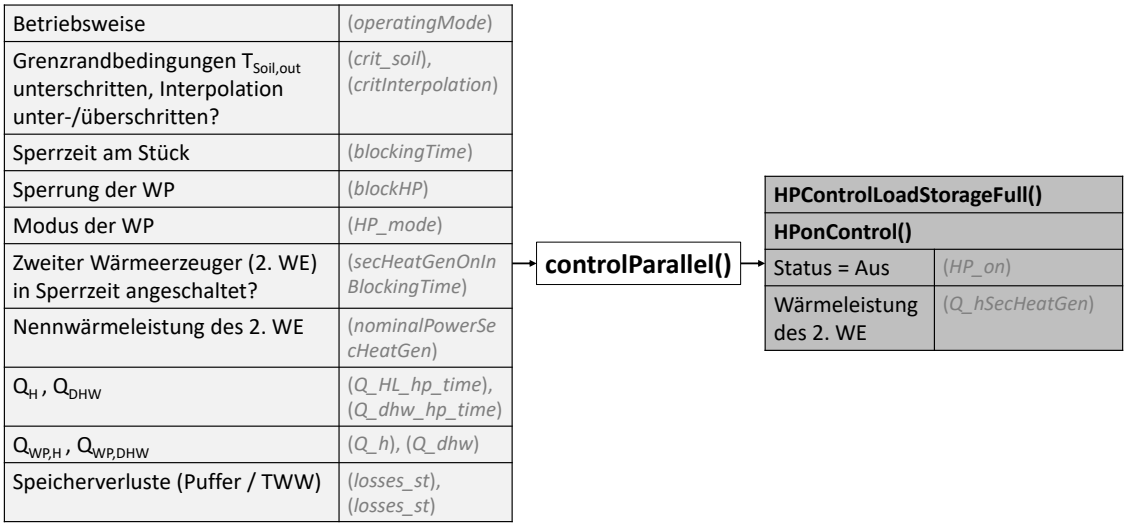


Abb. C.13.: Eingangsdaten und Ergebnisse der Regelungsstrategie der parallelen Betriebsweise (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

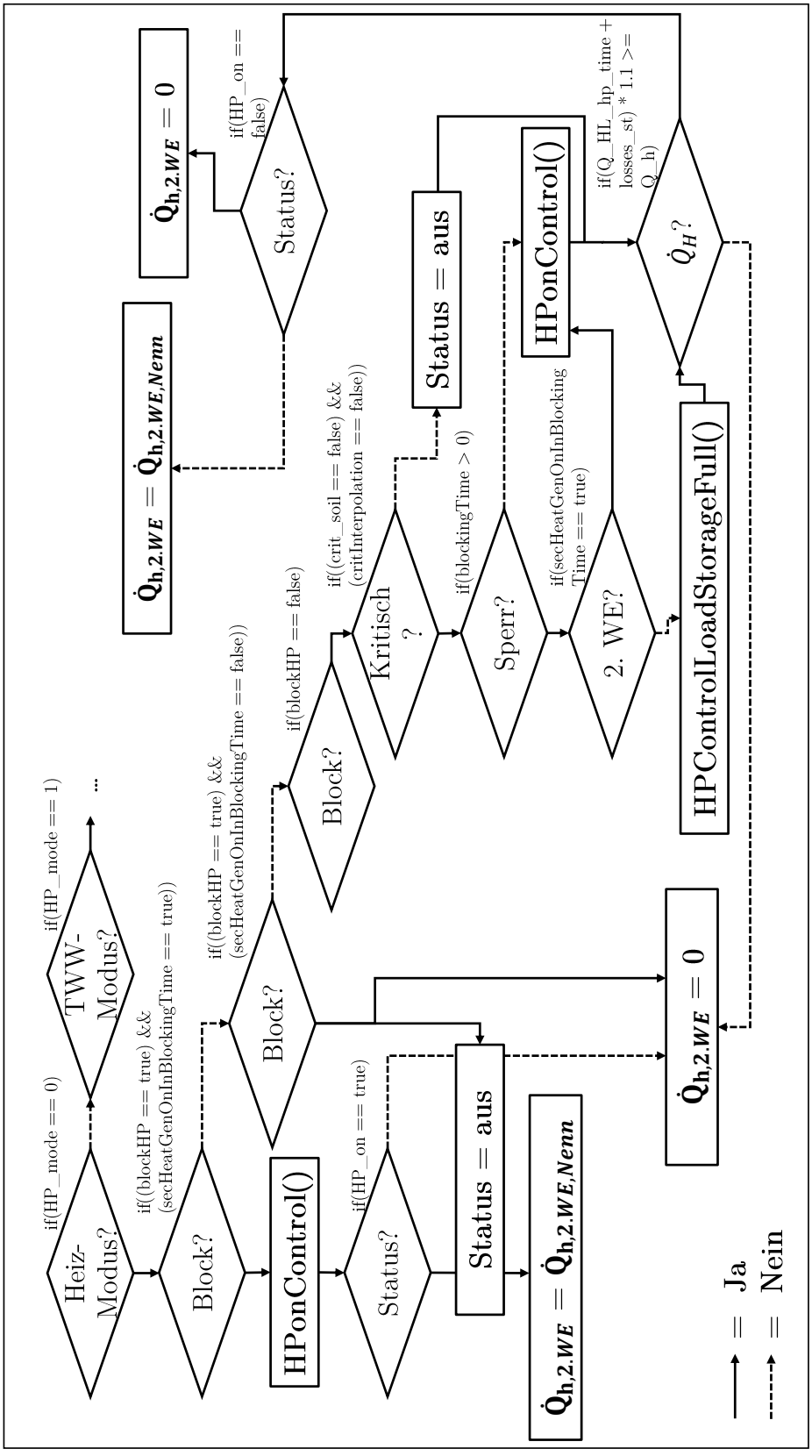


Abb. C.14.: Regelungsstruktur der parallelen Betriebsweise im Heizungsmodus

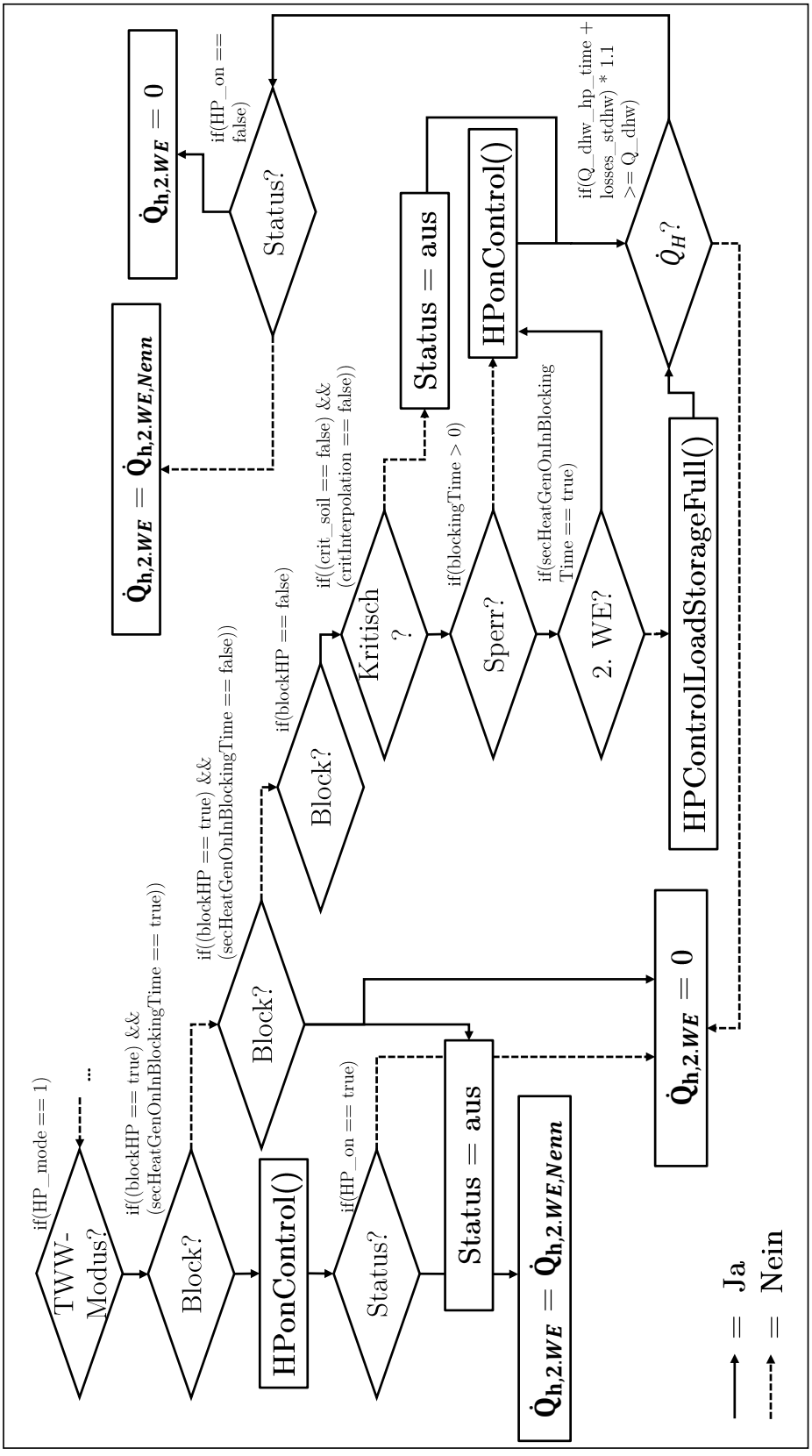


Abb. C.15.: Regelungsstruktur der parallelen Betriebsweise für den TWW-Modus

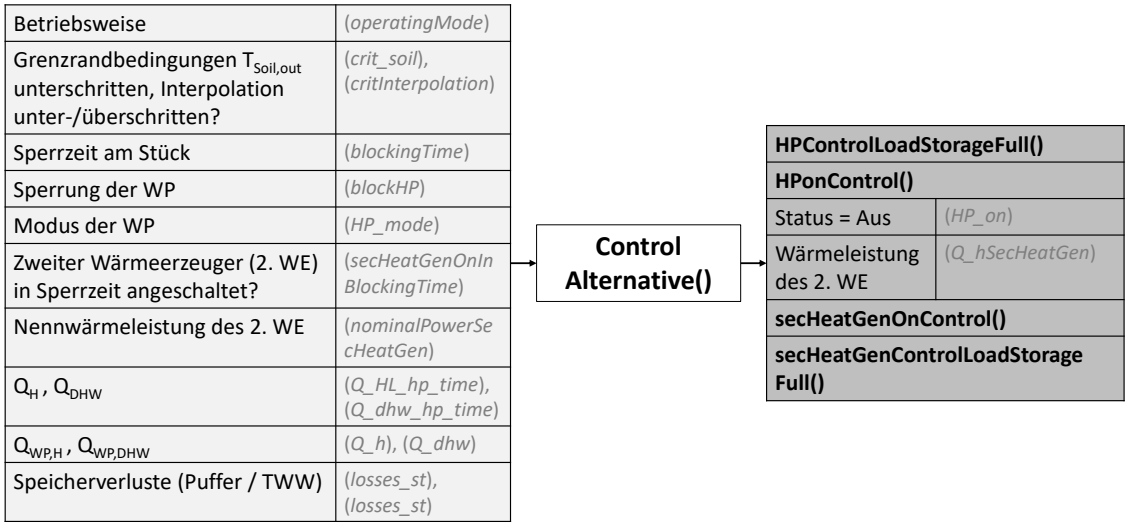


Abb. C.16.: Eingangsdaten und Ergebnisse der Regelungsstrategie der alternativen Betriebsweise (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

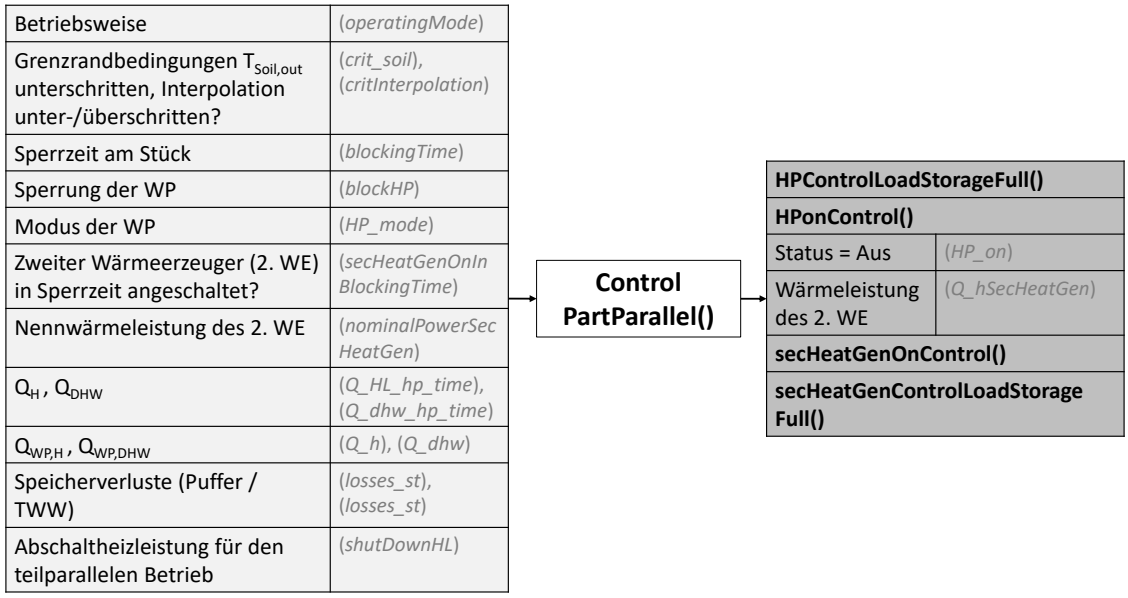


Abb. C.17.: Eingangsdaten und Ergebnisse der Regelungsstrategie der teil-parallelen Betriebsweise (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

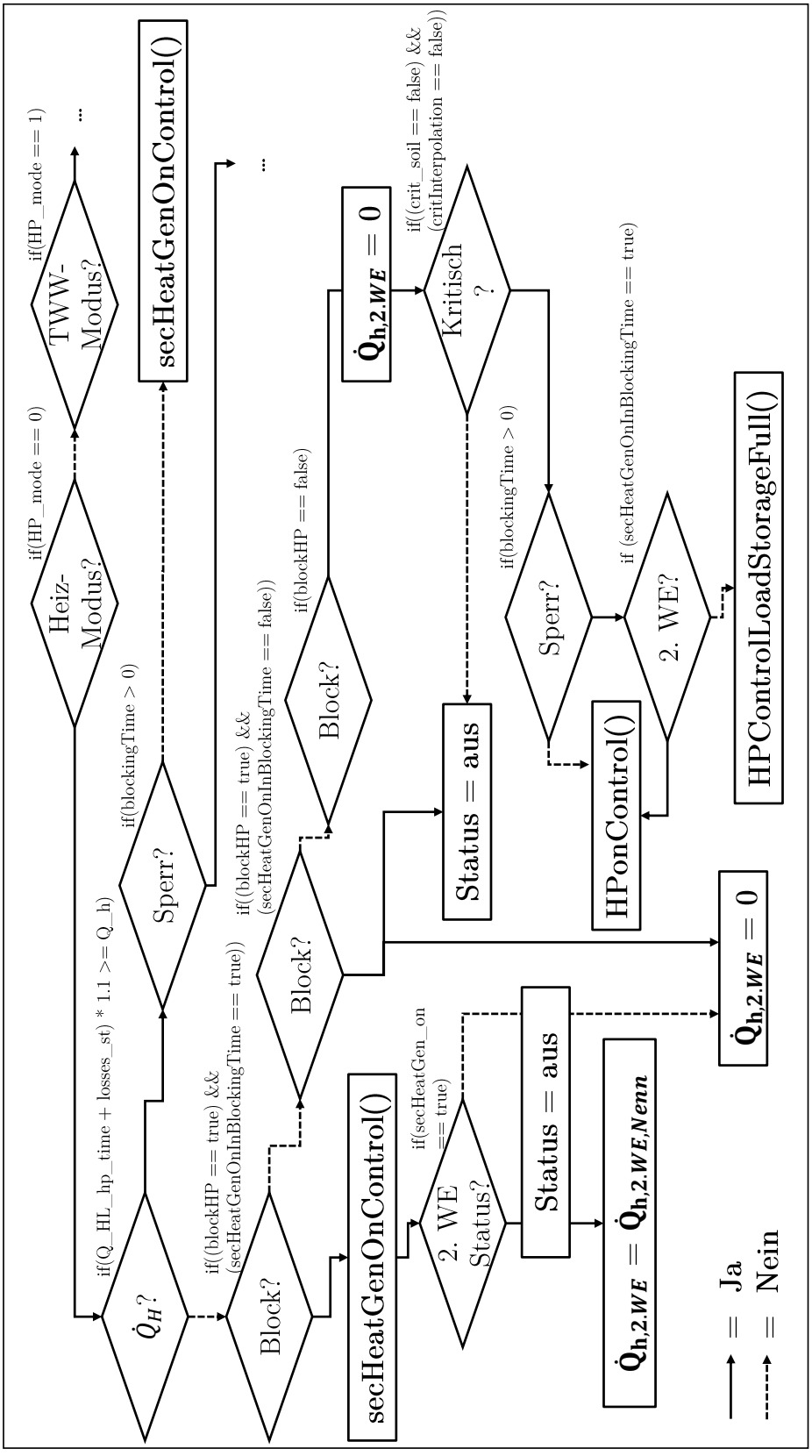


Abb. C.18.: Regelungsstruktur der alternativen Betriebsweise

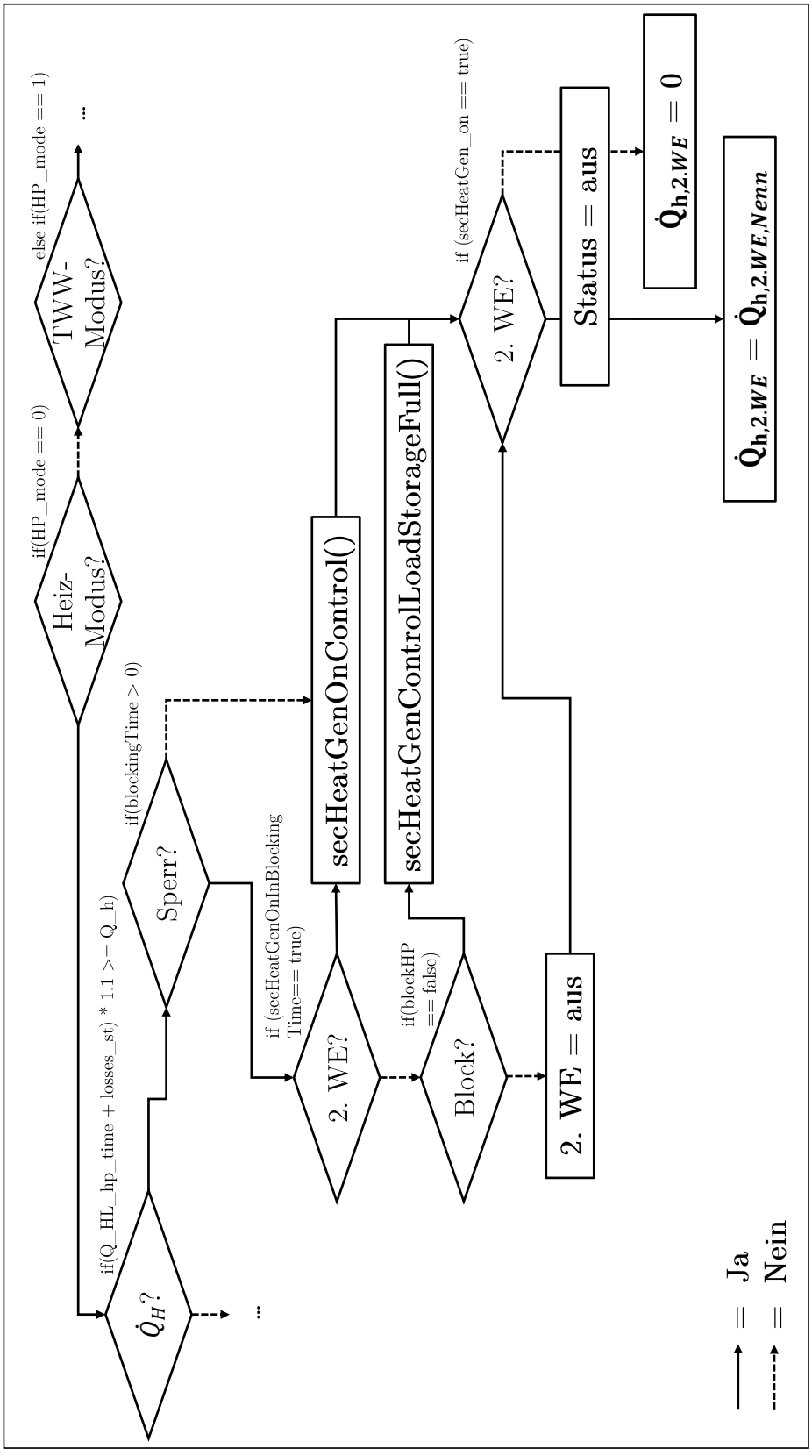


Abb. C.19.: Fortführung der Regelungsstruktur der alternativen Betriebsweise

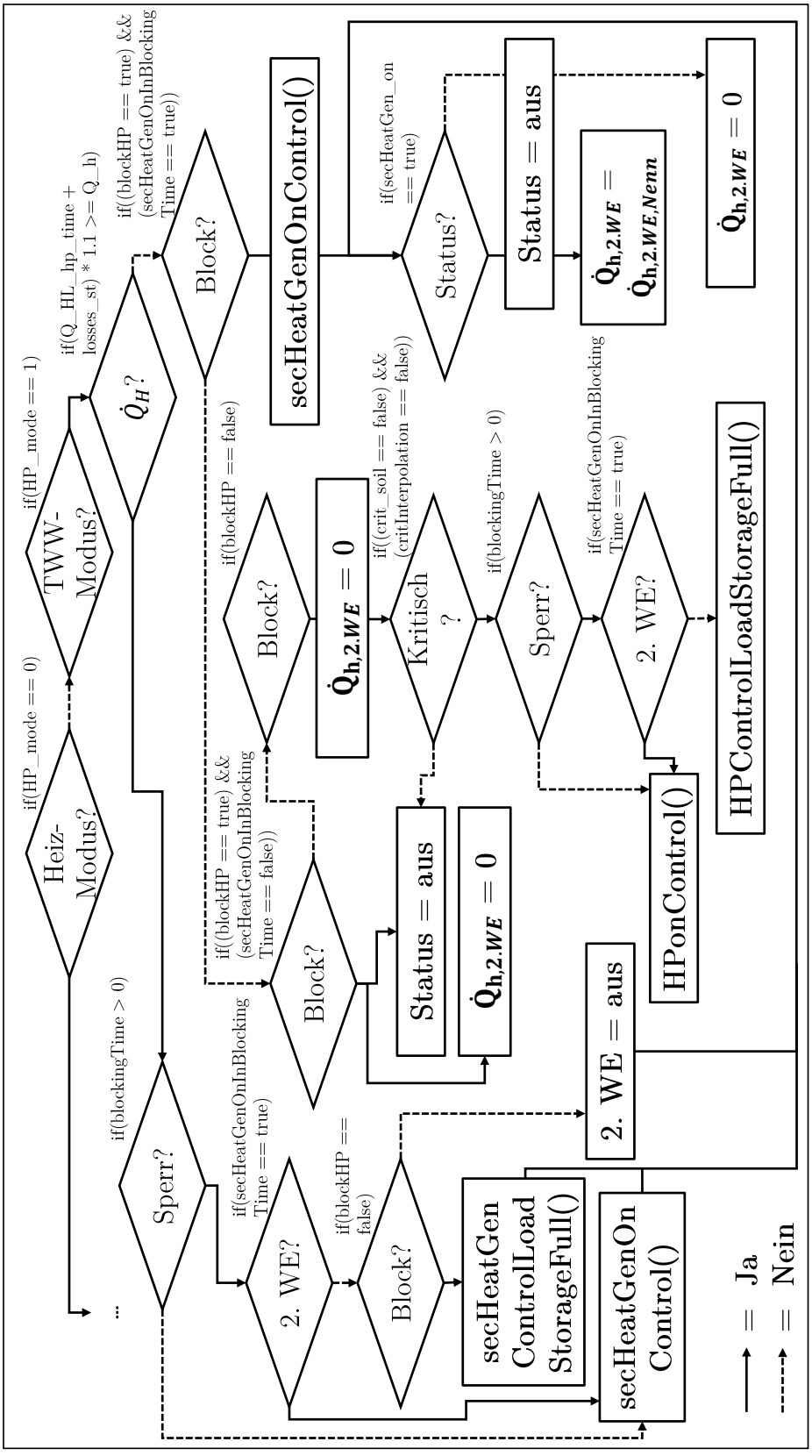


Abb. C.20.: Fortführung der Regelungsstruktur der alternativen Betriebsweise bei Modus = TWW

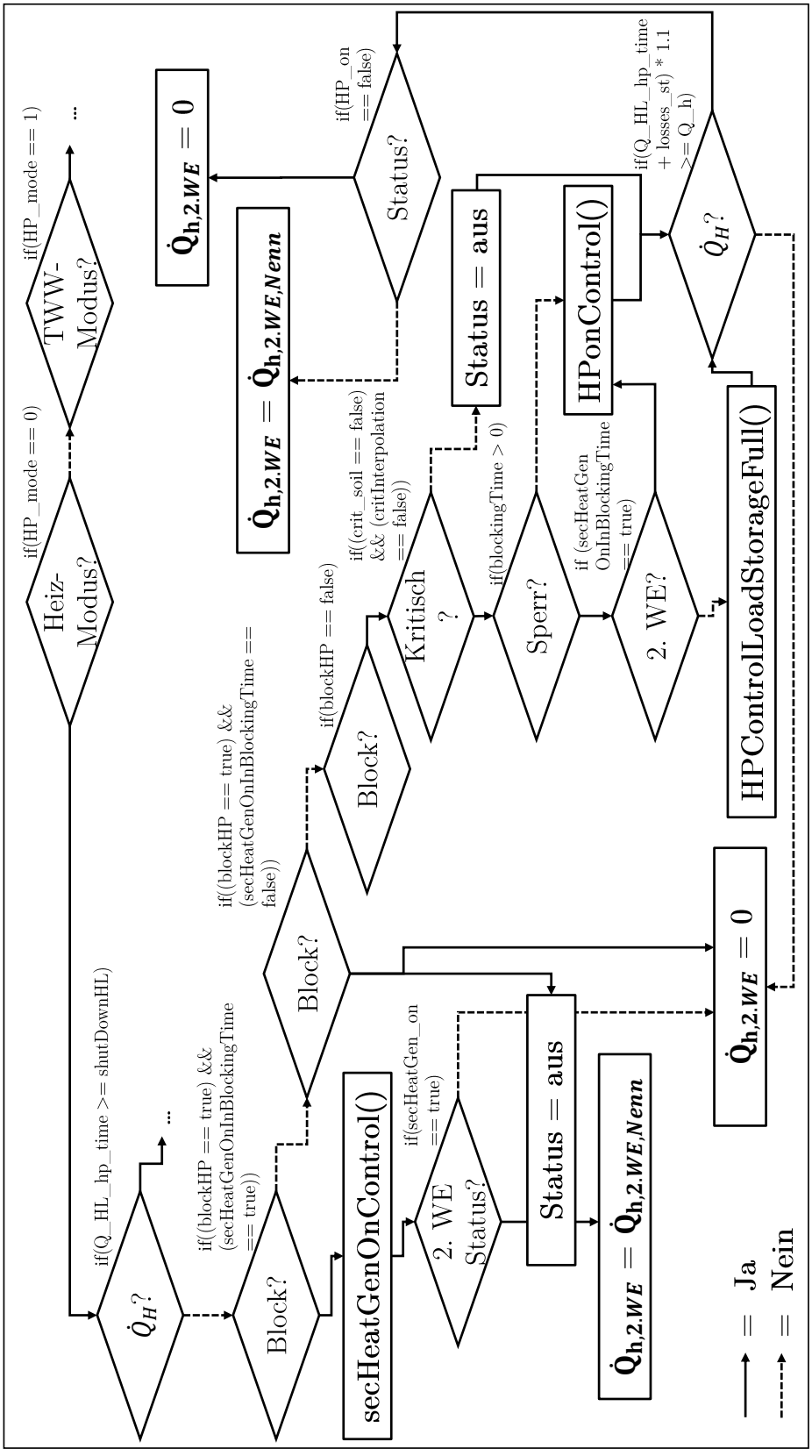


Abb. C.21.: Regelungsstruktur der teil-parallelen Betriebsweise

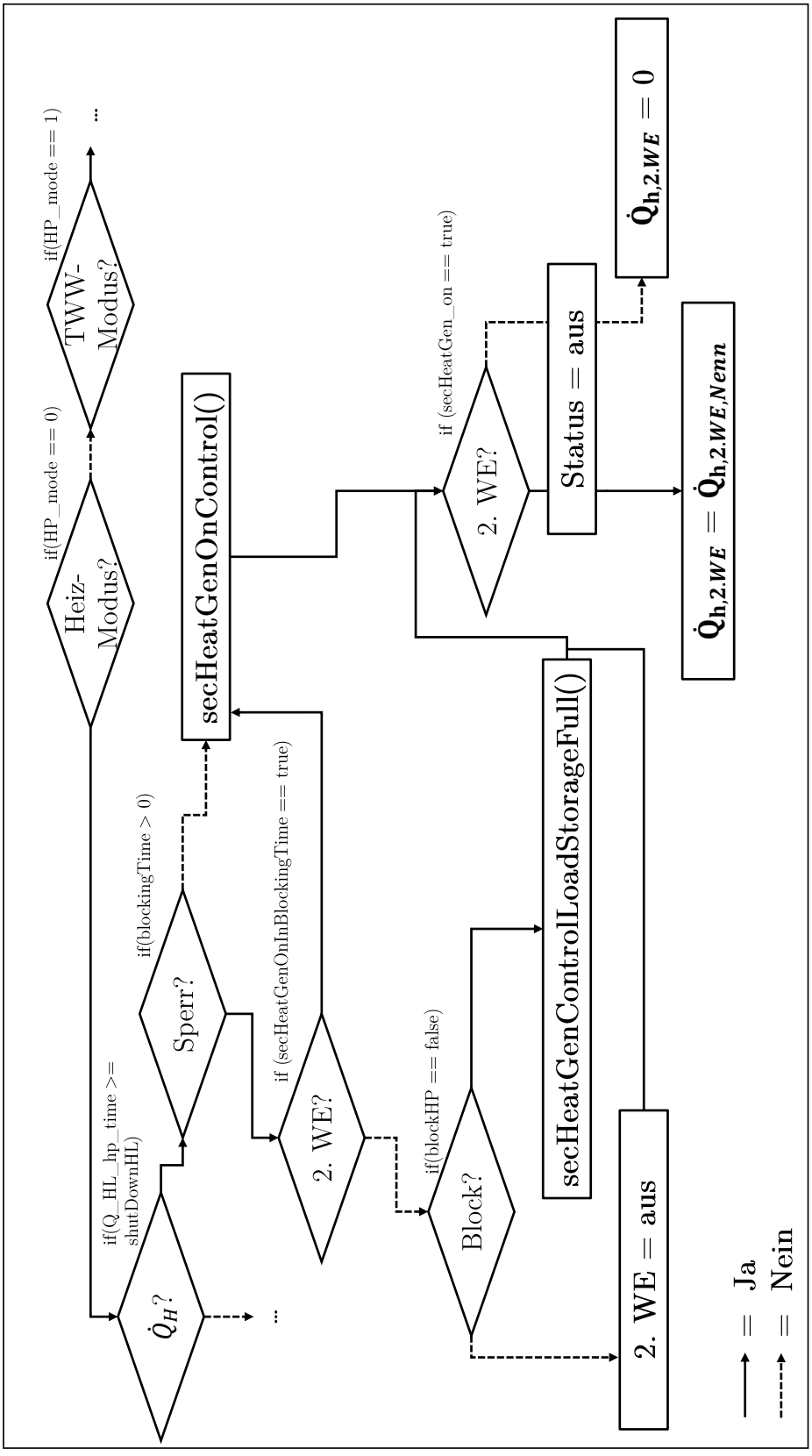


Abb. C.22.: Fortführung der Regelungsstruktur der teil-parallelen Betriebsweise

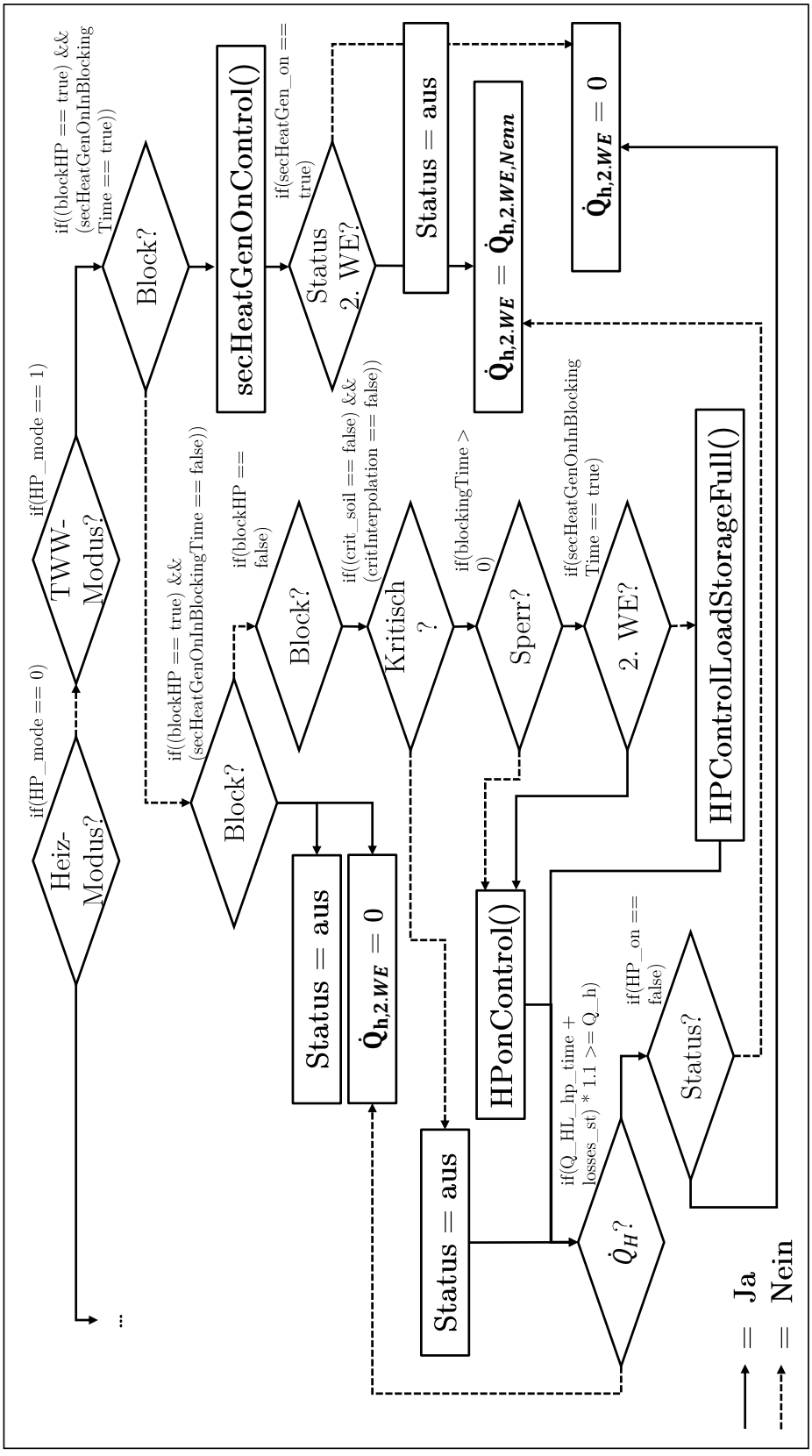


Abb. C.23.: Fortführung der Regelungsstruktur der teil-parallelen Betriebsweise bei Modus = TWW

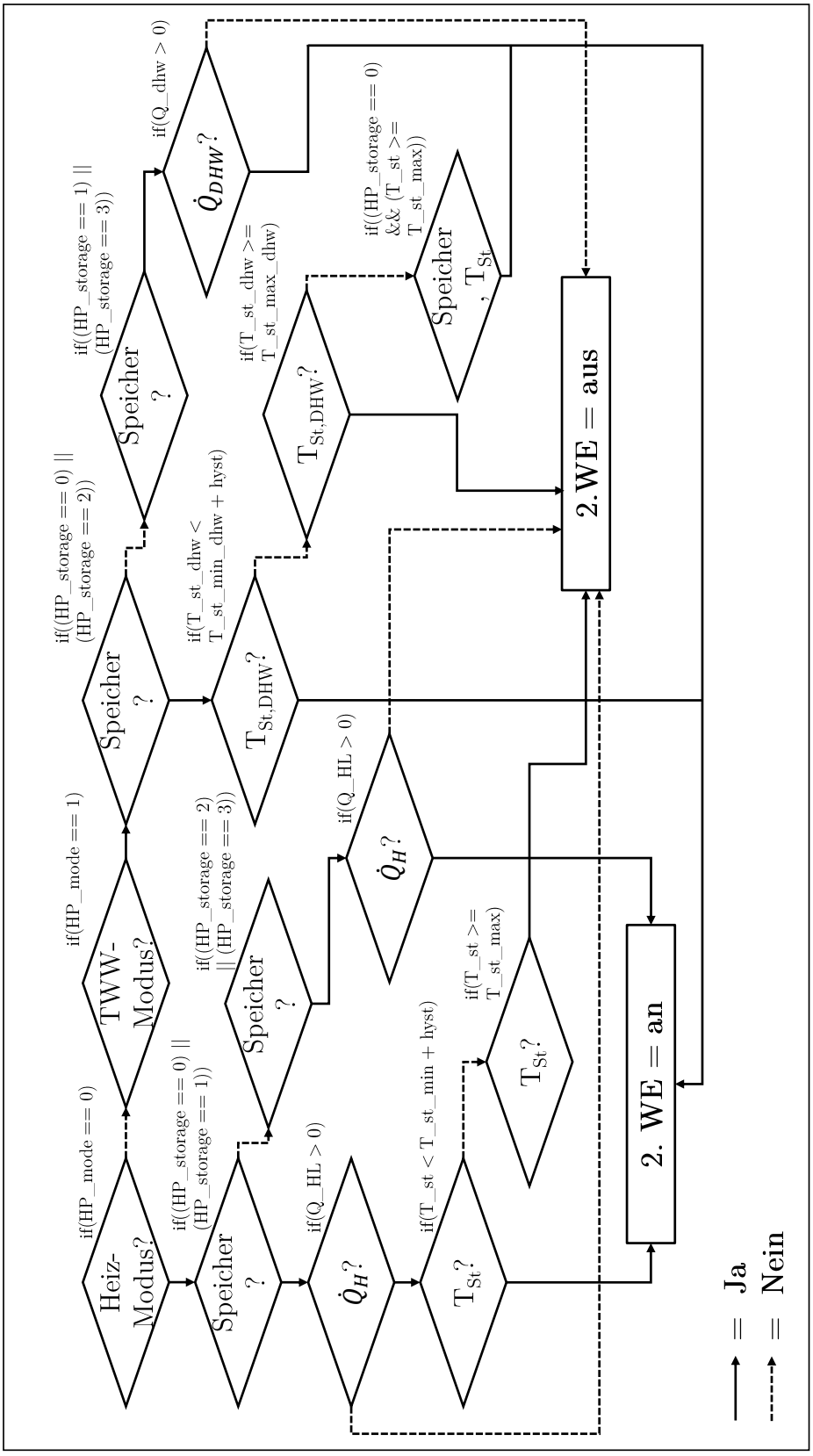


Abb. C.24.: Regelungsstruktur des zweiten Wärmeerzeugers (*secHeatGenOnControl*-Funktion) bei alleinigem Betrieb der teil-parallelen und alternativen Betriebsweise

C.6. Bilanz um den Wärmepumpenverdampfer

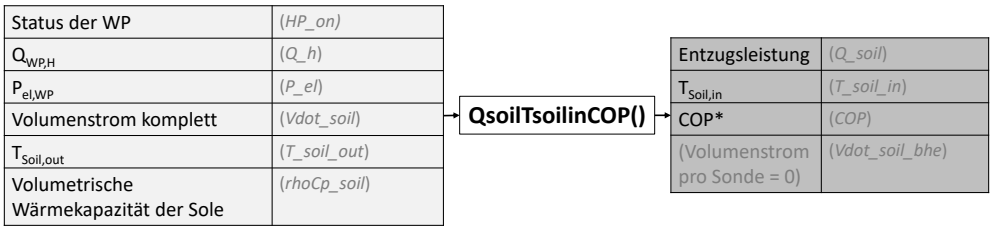


Abb. C.25.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *QsoilTsoilinCOP*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

C.7. Direkte Geothermische Kühlung

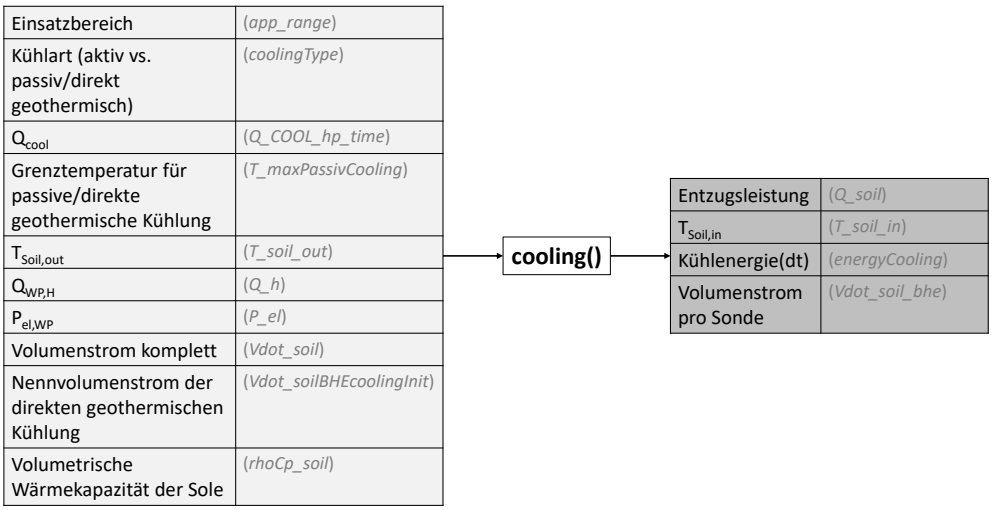


Abb. C.26.: Eingangsdaten und Ergebnisse der *cooling*-Funktion (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

C.8. Speicherbilanz

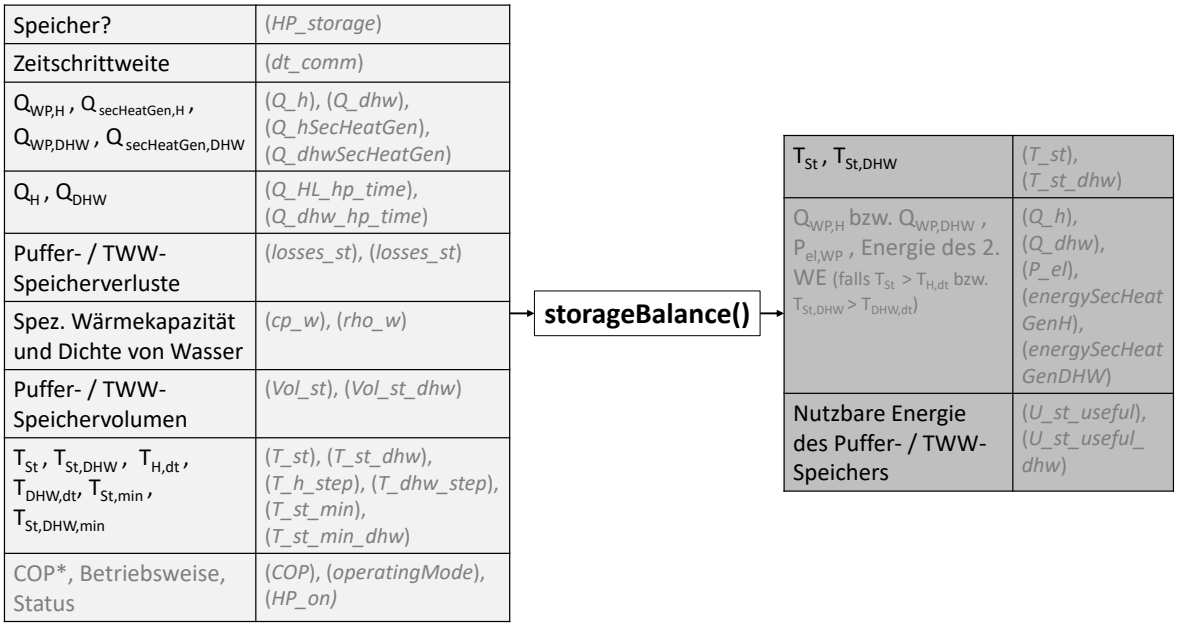


Abb. C.27.: Eingangsdaten und Ergebnisse der Speicherbilanzen (links Bezeichnung, rechts Variablenname im Quellcode)

C.9. Simulationsergebnisse

Tab. C.4.: Ergebnisparameter von ModHPS nach kompletter Simulationsdauer

Laufzeit der Wärmepumpe in jedem Betriebsjahr
Über alle Betriebsjahre gemittelte Laufzeit der Wärmepumpe
Summe der Stunden, in denen die Wärmepumpe aufgrund von Abschaltbedingungen des Untergrunds ausgeschaltet war
Durch die Wärmepumpe bereitgestellte Heizenergie in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil der Wärmepumpe für Heizung in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers für Heizung in jedem Betriebsjahr
Durch die Wärmepumpe bereitgestellte Energie für TWW in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil der Wärmepumpe für TWW in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers für TWW in jedem Betriebsjahr
Durch die Wärmepumpe bereitgestellte Energie für Heizung und TWW in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil der Wärmepumpe für Heizung und TWW in jedem Betriebsjahr
Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers für Heizung und TWW in jedem Betriebsjahr
Über alle Betriebsjahre gemittelter Deckungsanteil der Wärmepumpe für Heizung
Über alle Betriebsjahre gemittelter Deckungsanteil der Wärmepumpe für TWW
Über alle Betriebsjahre gemittelter Deckungsanteil der Wärmepumpe für Heizung und TWW
Über alle Betriebsjahre gemittelter Deckungsanteil des zweiten Wärmeerzeugers für Heizung und TWW
Über alle Betriebsjahre gemittelter Deckungsanteil der Wärmepumpe für Kühlung
Deckungsanteil der Wärmepumpe für Kühlung in jedem Betriebsjahr
Aufgewendete elektrische Energie der Wärmepumpe in jedem Betriebsjahr
JAZ (WP-Bilanz: nur Wärmepumpe und integrierte Solepumpe) in jedem Betriebsjahr
Über alle Betriebsjahre gemittelte JAZ (WP-Bilanz)
JAZ (WPA-Bilanz: Zusätzlich zur WP-Bilanz noch die externe Solepumpe und der Heizstab im Falle eines monoenergetischen Betriebs) in jedem Betriebsjahr
Über alle Betriebsjahre gemittelte JAZ (WPA-Bilanz)
Über alle Betriebsjahre gemittelter Jahresenergiebedarf für die externe Solepumpe

Tab. C.5.: Sonstige Ergebnisparameter von ModHPS aus der Textdatei des ersten und letzten Betriebsjahres für jeden Zeitschritt

Zeitschritt
Soleaustrittstemperatur
Eintritt der kritischen Bodengrenzrandbedingung (0 = nein; 1 = ja)
Heizleistungsanforderung des Gebäudes
TWW-Leistungsanforderung des Gebäudes
Wärmepumpe eingeschaltet? (0 = nein; 1 = ja)
Modus der Wärmepumpe
Wärmeleistung der Wärmepumpe für Heizung
Leistungsdeckung der Wärmepumpe für Heizung
Wärmeleistung der Wärmepumpe für TWW
Leistungsdeckung der Wärmepumpe für TWW
Elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
Leistungszahl der Wärmepumpe
Pufferspeichertemperatur
TWW-Speichertemperatur
Soleeintrittstemperatur
Temperaturdifferenz von Aus- und Eintritt der Sole in die Erdwärmesonde
Ist die Wärmepumpe gesperrt? (0 = nein; 1 = ja)

C.10. Randbedingungen der Ergebnisdiagramme

C.10.1. XML-Struktur

```
<getisData xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml/3.2" version="1.08">
    <!--Liste aller Klimadaten (kann multiple gestaltet werden, derzeit wird nur ein zentraler Datensatz benoetigt)-->
    <ClimateCollection>
        <climate xmlns:climate="URI-Climate" climate:id="a1">
            <climate:center_of_x>3761500</climate:center_of_x>
            <climate:center_of_y>5600000</climate:center_of_y>
            <!--Außenlufttemperatur (stündlich) TRY-Datensatz des jeweiligen Standorts und Jahres [GP: °C]-->
            <climate:air_temperature time_interval="3600" uom="K">271.25 270.85 270.25 270.15 [...]</climate:air_temperature>
        </climate>
    </ClimateCollection>
    <!--Liste aller Wärmepumpen-->
    <HeatPumpCollection>
        <!--Wärmepumpe 1 mit Koaxial-Sonden-->
        <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HPTest" heat_pump:simulateHP="1">
            <!--angeschlossene Gebäude-->
            <heat_pump:linked_buildings>B01</heat_pump:linked_buildings>
            <!--angeschlossene Sonden-->
            <heat_pump:linked_bhe>1579858938372</heat_pump:linked_bhe>
            <!--Wärmepumpenherstellername-->
            <heat_pump:name>WPC 07 / WPC 07 cool</heat_pump:name>
            <!--Betriebsweise der Wärmepumpe (0=monovalent, 1=monoenergetic, 2=bivalent prallel, 3 = bivalent teilparallel, 4 = bivalent alternativ)-->
            <heat_pump:operating_mode>1</heat_pump:operating_mode>
            <!--Einsatzbereich der Wärmepumpe (0=Heizung, 1=Trinkwassererwärmung, 2= Heizung+Trinkwassererwärmung, 3=Heizung+Kühlung, 4=Heizung+Kühlung+ Trinkwassererwärmung)-->
            <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
            <!--Betriebsweise des Verdichters/Kompressors (0=fixed-speed = taktender Betrieb; 1=modulating = modulierend)-->
            <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
            <!--Pufferspeichervolumen [GP: l]-->
            <heat_pump:volume_storage uom="m^3">1</heat_pump:volume_storage>
            <!--Bereitschaftswärmeaufwand Pufferspeicher aus Datenbank [GP: kWh/d]-->
            <heat_pump:static_loss_storage uom="W">45.8</heat_pump:static_loss_storage>
            <!--Trinkwarmwasserpeichervolumen [GP: l]-->
            <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.3</heat_pump:volume_storage_dhw>
            <!--Bereitschaftswärmeaufwand TWW-Speicher aus Datenbank [GP: kWh/d]-->
            <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">62.5</heat_pump:static_loss_storage_dhw>
            <!--Nenn-Trinkwarmwassertemperatur [GP: l]-->
            <heat_pump:T_dhw uom="K">329.15</heat_pump:T_dhw>
            <!--minimale Trinkwarmwassertemperatur [GP: l]-->
```

```
38  <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
39  <!--Temperaturstufe der WP für TWW (abh. von eingegebener T_dhw) (Auswahl
        anhand der notwendigen WP-Stufe) [GP: l]-->
40  <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_dhw>
41  <!--Herstellerangaben: wärmepumpenseitige minimale Heizungsvorlauftemperatur des
        WP-Typs (Heizungsseite: Kondensatoraustrittstemperatur (Sekundärkreislauf)) [GP
        : °C]-->
42  <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
43  <!--Herstellerangaben: wärmepumpenseitige maximale Heizungsvorlauftemperatur des
        WP-Typs (Heizungsseite: Kondensatoraustrittstemperatur (Sekundärkreislauf)) [GP
        : °C]-->
44  <heat_pump:Tmax_h uom="K">338.15</heat_pump:Tmax_h>
45  <!--Sondenvolumenstrom nach Wärmepumpendatenblatt(Wärmequellenseite) [GP: m
        ^3/h]-->
46  <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">5.056e-4</heat_pump:V_soil>
47  <!--Kritische minimale Bodenzellentemperatur (Wenn Zelle im Boden diese Temp.
        unterschreitet, dann WP aus) -> Simulationen brechen ab! [GP: l]-->
48  <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">268.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
49  <!--kritische Minimal-Sondenvorlauftemperatur zur Vordimensionierung oder aus Wä
        rmepumpendatenblatt (konst. bei -7,7 °C für STIEBEL-WP)[GP: °C]-->
50  <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
51  <!--kritische Maximal-Sondenvorlauftemperatur aus Wärmepumpendatenblatt (konst.
        bei 15,4 °C für STIEBEL-WP) [GP: °C]-->
52  <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
        Tmax_soil_in>
53  <!--Heizleistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Solerücklauftemperatur (aus
        WP-Sicht Wärmequelleneintritt) [GP: °C und kW]-->
54  <!--Solerücklauftemperatur in 5K-Schritten (aus WP-Sicht Wärmequelleneintritt) [
        GP: °C]-->
55  <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
        heat_pump:heating_power_T>
56  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 35 °C [GP: kW]-->
57  <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">6530 7500 8550 9600 10650 11700 </heat_pump:
        Q_h_W35>
58  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 40 °C [GP: kW]-->
59  <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
60  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 45 °C [GP: kW]-->
61  <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">6200 7110 8110 9050 9990 10930 </heat_pump:
        Q_h_W45>
62  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 50 °C [GP: kW]-->
63  <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
64  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 55 °C [GP: kW]-->
65  <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">6010 6910 7900 8890 9880 10950 </heat_pump:
        Q_h_W55>
66  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 60 °C [GP: kW]-->
67  <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 6750 7762.5 8775 9787.5 10800 </heat_pump:
        Q_h_W60>
68  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 65 °C [GP: kW]-->
69  <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 6600 7500 8400 9300 10200 </heat_pump:
        Q_h_W65>
70  <!--Heizleistung der Wärmepumpe bei T_h = 75 °C [GP: kW]-->
71  <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
```

```
72          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Solerücklauftemperatur (
                aus WP-Sicht Wärmequelleneintritt) [GP: °C und kW]-->
73          <!--Solerücklauftemperatur in 5K-Schritten (aus WP-Sicht Wärmequelleneintritt) [
                GP: °C]-->
74          <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
75          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 35 °C [GP:kW]-->
76          <heat_pump:P_el_W35 uom="W">1540 1550 1560 1570 1580 1590 </heat_pump:
                P_el_W35>
77          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 40 °C [GP:kW]-->
78          <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
79          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 45 °C [GP:kW]-->
80          <heat_pump:P_el_W45 uom="W">1900 1940 1960 1980 2000 2020 </heat_pump:
                P_el_W45>
81          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 50 °C [GP:kW]-->
82          <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
83          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 55 °C [GP:kW]-->
84          <heat_pump:P_el_W55 uom="W">2330 2350 2380 2390 2400 2410 </heat_pump:
                P_el_W55>
85          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 60 °C [GP:kW]-->
86          <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 2520 2525 2530 2535 2540 </heat_pump:
                P_el_W60>
87          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 65 °C [GP:kW]-->
88          <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 3000 3030.30303030303 3054.54545454545
                3074.38016528926 3090.90909090909 </heat_pump:P_el_W65>
89          <!--Verdichterleistung der Wärmepumpe bei T_h = 75 °C [GP:kW]-->
90          <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
91          <!--Leistung der externen Solepumpe (Wärmequellenseite) [GP: W]-->
92          <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">70</heat_pump:P_el_soil_pump>
93                  <!--Hysterese für WP-Reglung [GP:K] -->
94          <heat_pump:hysteresis uom="K">1</heat_pump:hysteresis>
95                  <!--Aktive oder passive Kühlung: 0 = passiv; 1 = aktiv [GP:passiv oder
                        aktiv] -->
96          <heat_pump:coolingType uom="K">0</heat_pump:coolingType>
97                  <!--Volumenstrom bei passiver Kühlung [GP:m^3/h] -->
98                  <heat_pump:Vdot_soil_cooling uom="m^3/s">1e-4</heat_pump:
                        Vdot_soil_cooling>
99                  <!--Maximale Soletemperatur für passive Kühlung -->
100         <heat_pump:maxTempPassivCooling uom="K">293.15</heat_pump:
                maxTempPassivCooling>
101                 <!--Längste Sperrzeit an einem Stück für WP-Reglung (max. 2 h) [GP:h]
                        -->
102         <heat_pump:blockingTime uom="s">3600</heat_pump:blockingTime>
103                 <!--Tageszeiten der Sperrung -->
104         <heat_pump:blockingHoursDay>12</heat_pump:blockingHoursDay>
105                 <!--Überbrückung durch den 2. WE in der Sperrdauer? 0 = Nein; 1 = ja;
                        -->
106         <heat_pump:secHeatGenOnInBlockingTime>0</heat_pump:
                secHeatGenOnInBlockingTime>
107                 <!--Mindestlaufzeit der WP [GP:min] -->
108         <heat_pump:minRunTime uom="s">10</heat_pump:minRunTime>
109                 <!--Nennleistung der WP für Heizung [GP:min] -->
```

```
110             <heat_pump:nominalPowerH uom="W">7500</heat_pump:nominalPowerH>
111                     <!--Nennleistung der WP für TWW [GP:min] -->
112             <heat_pump:nominalPowerDHW uom="W">6910</heat_pump:nominalPowerDHW>
113                     <!--Nennleistung des 2. WE [GP:kW] -->
114             <heat_pump:nominalPower2Heatgen uom="W">8800</heat_pump:
                    nominalPower2Heatgen>
115                     <!--Abschaltpunkt der WP im teilparallelen Betrieb [GP:°C] -->
116             <heat_pump:shutDownHL uom="W">12000</heat_pump:shutDownHL>
117                     <!--Faktor für die Abbildung von Kaskaden, wenn keine Kaskade, dann 1 [
                        GP:%] -->
118             <heat_pump:cascadeFactor>1</heat_pump:cascadeFactor>
119                     <!--JAZ der WP -->
120             <heat_pump:ResSCOP_WP>5</heat_pump:ResSCOP_WP>
121                     <!--JAZ der WP-Anlage (Solepumpe und 2. WE mit in Bilanz) -->
122             <heat_pump:ResSCOP_WPA>4.5</heat_pump:ResSCOP_WPA>
123                     <!--JAZ der WP-Heizungsanlage (Solepumpe, 2. WE und Speicher mit in
                        Bilanz) -->
124             <heat_pump:ResSCOP_WPHA>4</heat_pump:ResSCOP_WPHA>
125                     <!--Deckungsanteil der WP am Heizwärmebedarf (nur Heizung) [GP:%]
                        -->
126             <heat_pump:ResCoverRatioH>90</heat_pump:ResCoverRatioH>
127                     <!--Deckungsanteil der WP am TWW-Wärmebedarf (nur TWW) [GP:%]
                        -->
128             <heat_pump:ResCoverRatioDHW>100</heat_pump:ResCoverRatioDHW>
129                     <!--Deckungsanteil der WP am TWW-Wärmebedarf (nur TWW) [GP:%]
                        -->
130             <heat_pump:ResCoverRatioTotal>97</heat_pump:ResCoverRatioTotal>
131             <!--Deckungsanteil des 2. WE (Heizung + TWW) [GP:%] -->
132             <heat_pump:ResCRatioTotal2HeatGen>3</heat_pump:ResCRatioTotal2HeatGen>
133                     <!--Passiver Deckungsanteil am Kühlenergiebedarf (nur < 100 %, wenn
                        Temperaturrandbedingung icht eingehalten) [GP:%] -->
134             <heat_pump:ResCRatioPassivCooling>100</heat_pump:ResCRatioPassivCooling>
135             <!--COP für vereinfachte Berechnung -->
136             <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
137         </heat_pump>
138         <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP2" heat_pump:
                simulateHP="1">
139                     [...]
140         </heat_pump>
141     </HeatPumpCollection>
142     <!--Liste aller Gebäude-->
143     <BuildingCollection>
144         <!--GebäudeID-->
145         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="B01">
146             <!--angeschlossene Wärmepumpen-->
147             <building:linked_heat_pump>HPTest</building:linked_heat_pump>
148             <!--Wie sollen die Gebäudeenergiebedarfe berechnet werden? (0 = Verbrauchswert (
                    annual_energy_consumption); 1 = Heizlast nach 12831 (+Verluste building:loss_...);
                     2 = TEASER (nur TWW-Bedarf + Verluste-TWW -> nur
                    TWW_Erzeugerlastkurve))-->
149             <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
150             <!--Welche Heizlast wird für WP-Berechnung genommen? (0 = building:heating_load;
```

```
        1 = building:heating_load_corr_T_heating_limit; 2 = building:
        heating_load_no_heating_summer)-->
151     <building:which_HL>1</building:which_HL>
152     <!--Jahresheizenergieverbrauch (Heizung + TWW) [0:inf] [GP: kWh]-->
153     <building:annual_energy_consumption uom="J">4.68e+10</building:
        annual_energy_consumption>
154     <!--Anteil des TWW am Jahresenergieverbrauch [GP: %]-->
155     <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
156     <!--TWW-Zapfprofil-Art nach DIN 15450 (0 = Einzelperson; 1 = Familie (Duschen))
        -->
157     <building:dhw_profile_type>0</building:dhw_profile_type>
158     <!--Normheizlast nach DIN EN 12831 (Eingabe durch Nutzer) [0:inf] [GP: kW]-->
159     <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
160     <!--TWW-Bedarf, wenn TEASER benutzt wird [0:inf] [GP: MWh]-->
161     <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">8.424e+9</building:
        annual_energy_demand_dhw>
162     <!--Gebäudetyp: In XML: 0 = 'ResidentialBuilding'=(in GP: Wohngebäude), 1 = '
        NonResidentialBuilding'=(in GP: Nichtwohngebäude) -->
163     <building:type>0</building:type>
164     <!--Gebäudenutzung: In XML: 0 = 'SingleFamilyDwelling' (in GP: EFH), 1 = 'EST1' (
        in GP: kleines MFH), 2 = 'EST2' (in GP: Reihenhaus), 3 = 'EST3' (in GP:
        Zeilenbebauung), 4 = 'EST4' (in GP: großes MFH / Hochhaus), 5 = 'EST5' (in GP:
        Randblockbebauung), 6 = 'EST6' (in GP: dörfliche Bebauung), 7 = 'EST7' (in GP:
        historische Altstadtbebauung), 8 = 'EST8' (in GP: Innenstadtbebauung), 9 = 'Office
        ' (in GP: Bürogebäude) oder 10 = 'Institute' (in GP: Institut)-->
165     <building:usage>0</building:usage>
166     <!--Typ des Heizungsübergabesystems (0=Fußbodenheizung = floor_heating oder 1=
        Heizkörper/Radiatoren (Haus unsaniert) = radiators (not refurbished), 2 = Heizkö
        rper/Radiatoren (Haus saniert) = = radiators (refurbished))-->
167     <building:heating_system>0</building:heating_system>
168     <!--Nennvorlauftemperatur des Heizungsübergabesystems (bei Fußbodenheizung 35 °C
        und bei Heizkörpern 55 °C (Haus saniert) oder 65 °C (Haus unsaniert)) [GP: °C]--
        >
169     <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
170     <!--Minimale Vorlauftemperatur des Heizungsübergabesystems (bei Fußbodenheizung
        25 °C und bei Heizkörpern 40 °C (Haus saniert) oder 55 °C (Haus unsaniert) ) [GP:
        °C]-->
171     <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
172     <!--Temperaturstufe der WP für Heizung (abh. von eingegebener T_heating_system) (
        Auswahl anhand der notwendigen WP-Stufe) [GP: °C]-->
173     <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
174     <!--Heizgrenztemperatur des Gebäudes (Altbau 15 °C, Neubau 12 °C, Passivhaus 10 °C
        ) [GP: °C]-->
175     <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
176     <!--Baujahr-->
177     <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
178     <!--Sanierungsjahr-->
179     <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
180     <!--Lichte Raumhöhe [GP: m]-->
181     <building:room_height uom="m">2.51</building:room_height>
182     <!--Anzahl der Geschosse-->
183     <building:storeys_above_ground>2</building:storeys_above_ground>
```

```
184         <!--Nettogrundfläche [GP: m^2]-->
185         <building:net_floor_area uom="m^2">154.07</building:net_floor_area>
186         <!--Anzahl der beheizten Nachbargebäude-->
187         <building:neighbour_buildings>1</building:neighbour_buildings>
188         <!--Kompaktheit des Gebäudes (0 = kompact; 1 = elongated oder complex; 2 = use
                default values (for Office); 3 = elongated one corridor (for Office); 4 = elongated two
                 corridor (for Office); 5 = compact (for Office))-->
189         <building:layout>0</building:layout>
190         <!--Bauschwere des Gebäudes (0 = heavy = schwer; 1 = light = leicht)-->
191         <building:construction_type>0</building:construction_type>
192         <!--Dachtyp (0 = Flachdach; 1 = nicht beheizt; 2 = teilweise beheizt; 3 = beheizt)--
                >
193         <building:attic>2</building:attic>
194         <!--Dachgauben (0 = keine Dachgauben; 1 = Dachgauben vorhanden)-->
195         <building:dormer>0</building:dormer>
196         <!--Kellertyp (0 = kein Keller; 1 = nicht beheizt; 2 = teilweise beheizt; 3 = beheizt)
                -->
197         <building:cellar>1</building:cellar>
198         <!--Fenstertyp (0 = Standardwert; 1 = Einzelne Fenster in der Fassade; 2 = Fensterbä
                nder; 3 = vollverglast)-->
199         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
200         <!--Anzahl der Wohneinheiten (1 = Standardwert) (dieser Parameter gilt nur für
                building:usage = EST1 bis EST8b)-->
201         <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
202         <!--Lüftungsanlage vorhanden? (ja = 1; nein = 0 (default))-->
203         <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
204         <!--Normaußentemperatur nach DIN EN 12831 für SCoTED-->
205         <building:T_standard_outside uom="K">264.65</building:T_standard_outside>
206         <!--TWW-Zirkulation (0=Nein, 1=Ja)-->
207         <building:circulation>0</building:circulation>
208         <!--TWW-Verteilverluste pro Jahr (d = distribution) (im GP bezogen auf Nutzfläche)
                [0:inf] [GP: kWh]-->
209         <building:loss_dhw_d uom="J">2.8816632e+9</building:loss_dhw_d>
210         <!--Hilfsenergie für TWW-Verteilung pro Jahr (HE= help energy; d = distribution) (
                im GP bezogen auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]-->
211         <building:HE_dhw_d uom="J">0</building:HE_dhw_d>
212         <!--Hilfsenergie für TWW-Speicherung pro Jahr (HE= help energy; s = storage) (im
                GP bezogen auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]-->
213         <building:HE_dhw_s uom="J">0.847548e+8</building:HE_dhw_s>
214         <!--Hilfsenergie für TWW-Erzeugung pro Jahr (HE= help energy; g = generation) (im
                 GP bezogen auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]-->
215         <building:HE_dhw_g uom="J">2.542644e+8</building:HE_dhw_g>
216         <!--Heizungs-Übergabeverluste pro Jahr (ce = control & emission) (im GP bezogen
                auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]-->
217         <building:loss_heating_ce uom="J">2.7969084e+9</building:loss_heating_ce>
218         <!--Heizungs-Verteilverluste pro Jahr (d = distribution) (im GP bezogen auf Nutzflä
                che) [0:inf] [GP: kWh]-->
219         <building:loss_heating_d uom="J">1.483209e+10</building:loss_heating_d>
220         <!--Hilfsenergie für Heizungs-Verteilung pro Jahr (HE= help energy; d = distribution)
                 (im GP bezogen auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]-->
221         <building:HE_d uom="J">2.8816632e+9</building:HE_d>
222         <!--Hilfsenergie für Heizungs-Erzeugung pro Jahr (HE= help energy; g = generation) (
```

```
                im GP bezogen auf Nutzfläche) [0:inf] [GP: kWh]--->
223             <building:HE_g uom="J">9.323028e+8</building:HE_g>
224             <!--Heizwärmebedarf des Gebäudes nach TEASER oder Erzeugerlastkurve nach
                    SCoTED (Stundenschrittweite; gerundet auf natürliche Zahlen) [GP: kW]--->
225             <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">3856 3947 4084 4106 4106 [...]
                    </building:heating_load>
226             <!--Korrigierte Heizlast/Erzeugerlast des Gebäudes um Heizgrenztemperatur (
                    Stundenschrittweite; gerundet auf natürliche Zahlen) [GP: kW]--->
227             <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">3856
                    3947 4084 4106 4106 [..]</building:heating_load_corr_T_heating_limit>
228             <!--Korrigierte Heizlast/Erzeugerlast des Gebäudes mit Heizungsabschaltung im
                    Sommer vom 01.05. - 30.09. (Stundenschrittweite; gerundet auf natürliche Zahlen) [
                    GP: kW]--->
229             <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">3856
                    3947 4084 4106 4106 [...]</building:heating_load_no_heating_summer>
230             <!--Kühllast des Gebäudes (Stundenschrittweite; gerundet auf natürliche Zahlen) [GP:
                    kW])--->
231             <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                     [...]</building:cooling_load>
232             <!--Jahreskühlenergieverbrauch [0:inf] [GP: MWh]--->
233             <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
234             <!--TWW-Zapfprofile (aus Datenbank je nach TWW-Zapfprofil-Art) --->
235             <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...]</building:dhw_profile>
236             <!--Trinkwarmwasserbedarfsprofil aus SCoTED [0:inf]--->
237             <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 641 320 320 0 641
                    962 0 0 0 0 0 641 0 1282 1603 0 0 [...]</building:dhw_load>
238         </building>
239         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="B02">
240             [...]
241         </building>
242     </BuildingCollection>
243     <!--Liste aller Sonden-->
244     <BHECollection>
245         <BHE xmlns:bhe="URI-BHE" bhe:id="1579858938372">
246             <bhe:bhe_name>undefined</bhe:bhe_name>
247             <bhe:linked_heat_pump>HP01</bhe:linked_heat_pump>
248             <bhe:linked_BHE_field>undefined</bhe:linked_BHE_field>
249             <bhe:type>0</bhe:type>
250             <bhe:position>
251                 <gml:Point gml:id="1579858938372" srsDimension="2" srsName="ESPG:25832">
252                     <gml:pos>323246.0634037661 5629834.620467263</gml:pos>
253                 </gml:Point>
254             </bhe:position>
255             <bhe:length uom="m">90</bhe:length>
256             <bhe:cover_height uom="m">1</bhe:cover_height>
257             <bhe:borehole_diameter uom="m">0.13</bhe:borehole_diameter>
258             <!-- Horizontaler Rohrabstand [>2* bhe:outer_diameter_pipe : bhe:borehole_diameter
                    -bhe:outer_diameter_pipe] [GP: mm]--->
259             <bhe:pipe_distance uom="m">0.05</bhe:pipe_distance>
260             <!-- Äußerer Rohrdurchmesser [>0: <bhe:borehole_diameter] [GP: mm]--->
```

```
261             <bhe:outer_diameter_pipe uom="m">0.032</bhe:outer_diameter_pipe>
262             <!-- Rohrwanddicke [>0 : <bhe:outer_diameter_pipe/2] [GP: mm]-->
263             <bhe:wall_thickness_pipe uom="m">0.0029</bhe:wall_thickness_pipe>
264             <!-- Wärmeleitfähigkeit Rohr [0:inf] [GP: W/mK]-->
265             <bhe:thermal_conductivity_pipe uom="W/mK">0.38</bhe:thermal_conductivity_pipe
                    >
266             <bhe:thermal_conductivity_grout uom="W/mK">1</bhe:thermal_conductivity_grout
                    >
267             <bhe:grout_volumetric_heat_capacity uom="J/m^3K">2190000</bhe:
                    grout_volumetric_heat_capacity>
268             <bhe:brine_thermal_conductivity uom="W/mK">0.452</bhe:
                    brine_thermal_conductivity>
269             <bhe:brine_density uom="kg/m^3">1050.6</bhe:brine_density>
270             <bhe:brine_volumetric_heat_capacity uom="J/m^3K">3966462.6</bhe:
                    brine_volumetric_heat_capacity>
271             <bhe:brine_dynamic_viscosity uom="K Pas">263.15 0.00695 273.15 0.00478 283.15
                    0.00339 293.15 0.00249</bhe:brine_dynamic_viscosity>
272             <bhe:distance2heatpump uom="m">10</bhe:distance2heatpump>
273         </BHE>
274                 [...]
275     </BHECollection>
276     <!-- Daten aus Thermal Response Test-->
277     <ThermalResponseData xmlns:trd="URI-TRT">
278         <!--Effektive Waermeleitfaehigkeit des Untergrunds [GP: W/mK]-->
279         <trd:lambda_effective uom="W/mK"/>
280         <!--Waermekapazitaet des Untergrunds [GP: MJ/m^3K]-->
281         <trd:ground_volumetric_heat_capacity uom="J/m^3K"/>
282         <!--Ungestörte Untergrundtemperatur [GP: °C]-->
283         <trd:undisturbed_ground_temperature uom="K"/>
284         <!--Bohrlochwiderstand Rb [GP: mK/W]-->
285         <trd:borehole_thermal_resistance uom="mK/W"/>
286     </ThermalResponseData>
287     <!--Setup für Simulationen-->
288     <SimulationSetup xmlns:simbuild="URI-SimBuild" xmlns:simhp="URI-HeatPump" xmlns:
            simsoil="URI-SimSoil">
289         <!--Gebäudesimulation-->
290         <simbuild:start_time uom="s">0</simbuild:start_time>
291         <simbuild:end_time uom="s">31536000</simbuild:end_time>
292         <simbuild:time_step uom="s">3600</simbuild:time_step>
293         <!--Wetterdatensatz anhand des Standortes in Anlehnung an TRY (Standort: z. B. Essen;
                Jahr: 2015 oder 2045; Periode: Jahr oder Sommer oder Winter)-->
294         <simbuild:weather_data>TRY2015_37615002676500_Jahr</simbuild:weather_data>
295         <!--Untergrundsimulation-->
296         <simsoil:domain_height uom="m">130</simsoil:domain_height>
297         <simsoil:start_time uom="s">0</simsoil:start_time>
298         <simsoil:end_time uom="s">63072000</simsoil:end_time>
299                 <!--Welches UG-Modell ist mit WP-Modell gekoppelt: 0 = konstante UG-
                        Temperatur; 1 = abnehmende UG-Temperatur; 2 = UG-Temperaturdatensatz
                        (in Abhängigkeit von dt_UG); 3 = numerisch MPFluidGeTIS ; 4 = analytisch
                        GeTIS; 5 = anderes iterarives UG-Model; 6 = anderes nicht iterative UG-
                        Modell; 7 = Wärmenetzmodell-->
300         <simsoil:ugModel>1</simsoil:ugModel>
```

```
301         <!--Wärmepumpensimulation-->
302         <simhp:dt_comm uom="s">60</simhp:dt_comm>
303     </SimulationSetup>
304     <NodeCollection>
305         [...]
306     </NodeCollection>
307     <!-- Grundwasserdaten -->
308     <GroundWaterCollection>
309         <Horizon xmlns:ground_water="URI-GroundWater" ground_water:id="horizon01">
310             [...]
311         </Horizon>
312     </GroundWaterCollection>
313 </getisData>
```

Anhang D.

GeoWPSys+Web

D.1. Dateneingabe

Tab. D.1.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich Gebäude- und Haustechnik

Bezeichnung	Parameterart
Neubau/Bestandsgebäude	Auswahl
Bleibt das aktuelle Heizungssystem bestehen?	Auswahl
Alter des bestehenden Heizungssystems	Eingabe (optional)
Gebäudeart (Wohn- / Nichtwohngebäude)	Auswahl
Normaußentemperatur	Anzeige (aus Geoportal; standortabhängig)
Heizgrenztemperatur	Auswahl (10 °C, 12 °C oder 15 °C)
Nettogrundfläche	Eingabe
Sperrzeiten	Ankreuzfeld
Sperrdauer pro Tag	Auswahl (optional)
Sperrdauer am Stück	Auswahl (optional)
Uhrzeit der Sperrzeiten	Eingabe (optional)

Tab. D.2.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich Energiebedarf

Bezeichnung	Parameterart
Heizlast und/oder Bedarfe bekannt?	Auswahl
Variante der vorhandenen Bedarfs-Heizlast-Kombination	Auswahl (optional)
Simulation	Button (öffnet Simulationsfenster; optional)
Normheizlast nach DIN EN 12831	Eingabe (optional)
Jahresheizwärmebedarf (nur Heizung)	Eingabe (optional)
Jahreswärmebedarf TWW	Eingabe (optional)
Jahreswärmebedarf (Heizung & TWW)	Eingabe (optional)
TWW-Anteil am Jahresheizenergiebedarf	Eingabe (optional)
Zusätzlicher Jahreswärmebedarf nach VDI 4645	Eingabe (optional)

Tab. D.3.: Eingangsparameter des Simulationsfensters für den TEASER-Workflow von GeoWPSys+Web (im Themenbereich Energiebedarf)

Bezeichnung	Parameterart
Art der Lastkurve	Auswahl
Gebäudetyp	Auswahl / aus Geoportal
Baujahr	Eingabe / aus Geoportal
Lichte Raumhöhe	Eingabe / aus Geoportal
Geschossanzahl	Eingabe / aus Geoportal
Anzahl direkter Nachbargebäude	Eingabe / aus Geoportal
Kompaktheit	Auswahl / aus Geoportal
Bauschwere	Auswahl
Dachform	Auswahl / aus Geoportal
Dachgauben	Auswahl
Keller	Auswahl
Lüftungsanlage	Auswahl
TWW-Zapfprofilart nach DIN 15450	Auswahl / aus Geoportal
Normaußentemperatur	Anzeige (aus Geoportal; standortabhängig)
Heizgrenztemperatur	Anzeige (aus vorherigen Eingaben)

Tab. D.4.: Eingangsparameter des Simulationsfensters für den SCoTED-Workflow von GeoWPSys+Web (im Themenbereich Energiebedarf)

Bezeichnung	Parameterart
Normaußentemperatur	Anzeige (aus Geoportal; standortabhängig)
Heizgrenztemperatur	Anzeige (aus vorherigen Eingaben)
Art der Lastkurve	Auswahl
TWW-Anteil am Jahresheizenergiebedarf	Eingabe (optional)
TWW-Zapfprofilart nach DIN 15450	Auswahl / aus Geoportal

Tab. D.5.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich Heizungssystem

Bezeichnung	Parameterart
Heizungsart (Flächenheizung / Heizkörper)	Auswahl
Vorlauftemperatur	Eingabe
Minimale Vorlauftemperatur	Anzeige (berechnet)
Größe der Flächenheizung	Eingabe (optional)
Anzahl der Heizkörper	Eingabe (optional)
Nenn-TWW-Temperatur	Auswahl
Minimale TWW-Speichertemperatur	Anzeige (berechnet)
Übergabeverluste	Eingabe
Verteilverluste	Eingabe

Tab. D.6.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich geothermisches Quellensystem

Bezeichnung	Parameterart
Mittlere spezifische Entzugsleistung der Erdwärmesonde	Eingabe

Tab. D.7.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich Wirtschaftlichkeit

Bezeichnung	Parameterart
Spezifische Kosten Heizwärmeübergabesystem	Eingabe
Gesamtkosten Heizwärmeübergabesystem	Anzeige (berechnet)
Spezifische Kosten Quellensystem	Eingabe
Zusätzliche Investitionskosten Wärmepumpensystem	Eingabe
Zusätzliche Investitionskosten Vergleichssystem	Eingabe
Stromtarif	Auswahl
Haushaltsstromtarif bzw. Wärmepumpenstromtarif (variabler Anteil)	Eingabe (optional)
Grundkosten Haushaltsstromtarif bzw. Wärmepumpenstromtarif	Eingabe (optional)
Strompreissteigerung	Eingabe (Vektor)
Gaspreissteigerung	Eingabe (Vektor)
Betriebskostensteigerung	Eingabe
CO_2-Preissteigerung	Eingabe/Anzeige (Vektor)
Kalkulationszins	Eingabe

Tab. D.8.: Eingangs- und Ergebnisparameter von GeoWPSys+Web im Themenbereich CO_2-Äquivalente und Primärenergiefaktoren

Bezeichnung	Parameterart
CO_2-Äquivalent Strom	Eingabe
Soll das CO_2-Äquivalent pro Jahr absinken?	Ankreuzfeld
Jährliche Absenkung des CO_2-Äquivalents	Eingabe (Vektor)
CO_2-Äquivalent Gas	Eingabe
Primärenergiefaktor Strom	Eingabe
Soll der Primärenergiefaktor pro Jahr absinken?	Ankreuzfeld
Jährliche Absenkung des Primärenergiefaktors	Eingabe (Vektor)
Primärenergiefaktor Gas	Eingabe

D.2. Komponenten-XML

```
1  <Collection type="relevant Data">
2      <HPcollection>
3              <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" index="0">
4                  <heat_pump:name uom="">WPC 04</heat_pump:name>
5                  <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15
                       288.15 293.15</heat_pump:heating_power_T>
6                  <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15
                       288.15 293.15</heat_pump:compressor_power_T>
7                  <heat_pump:Q_h_65 uom="W">0.0 4100.0 4600.0 5100.0
                       5633.33333333333 6150.0</heat_pump:Q_h_65>
8                  <heat_pump:Q_h_45 uom="W">3870.0 4360.0 5000.0 5640.0 6280.0 6920.0
                       </heat_pump:Q_h_45>
9                  <heat_pump:Q_h_75 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                       Q_h_75>
10                 <heat_pump:Q_h_60 uom="W">0.0 4195.0 4700.0 5205.0
                       5766.66666666667 6300.0</heat_pump:Q_h_60>
11                 <heat_pump:Q_h_40 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                       Q_h_40>
12                 <heat_pump:Q_h_50 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                       Q_h_50>
13                 <heat_pump:Q_h_55 uom="W">3700.0 4250.0 4800.0 5350.0 5900.0 6450.0
                       </heat_pump:Q_h_55>
14                 <heat_pump:Q_h_35 uom="W">4080.0 4770.0 5380.0 5990.0 6600.0 7210.0
                       </heat_pump:Q_h_35>
15                 <heat_pump:P_el_65 uom="W">0.0 2050.0 2021.97802197802 2000.0
                       1981.12795263575 2031.6654580614</heat_pump:P_el_65>
16                 <heat_pump:P_el_45 uom="W">1290.0 1300.0 1310.0 1320.0 1330.0 1340.0
                       </heat_pump:P_el_45>
```

```
17  <heat_pump:P_el_75 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
        P_el_75>
18  <heat_pump:P_el_60 uom="W">0.0 1690.0 1715.0 1746.66666666667
        1778.33333333333 1810.0</heat_pump:P_el_60>
19  <heat_pump:P_el_40 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
        P_el_40>
20  <heat_pump:P_el_50 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
        P_el_50>
21  <heat_pump:P_el_55 uom="W">1570.0 1560.0 1580.0 1600.0 1620.0 1640.0
        </heat_pump:P_el_55>
22  <heat_pump:P_el_35 uom="W">1050.0 1060.0 1050.0 1040.0 1030.0 1020.0
        </heat_pump:P_el_35>
23  <heat_pump:T_brine uom="[K]">273.15</heat_pump:T_brine>
24  <heat_pump:T_VL uom="[°C]">35</heat_pump:T_VL>
25  <heat_pump:Q_h uom="[W]">4770</heat_pump:Q_h>
26  <heat_pump:P_el uom="[W]">1060</heat_pump:P_el>
27  <heat_pump:cost uom="[Euro]">10181</heat_pump:cost>
28  <heat_pump:proposed_storage uom="">SBP 200E</heat_pump:
        proposed_storage>
29  <heat_pump:volume_storage uom="[l]">207</heat_pump:volume_storage
        >
30  <heat_pump:cost_storage uom="[Euro]">917</heat_pump:cost_storage>
31  <heat_pump:losses_storage uom="[kWh/d]">1.1</heat_pump:
        losses_storage>
32  <heat_pump:proposed_dhw_storage uom="">bereits integriert</
        heat_pump:proposed_dhw_storage>
33  <heat_pump:volume_dhw_storage uom="[l]">175</heat_pump:
        volume_dhw_storage>
34  <heat_pump:cost_dhw_storage uom="[Euro]">0</heat_pump:
        cost_dhw_storage>
35  <heat_pump:losses_dhw_storage uom="[kWh/d]">1.9</heat_pump:
        losses_dhw_storage>
36  <heat_pump:Q_heating_element uom="[W]">8800</heat_pump:
        Q_heating_element>
37  <heat_pump:cost_heating_element uom="[Euro]">0</heat_pump:
        cost_heating_element>
38  <heat_pump:cost_pump uom="[Euro]">0</heat_pump:cost_pump>
39  <heat_pump:cost_expansion_vessel uom="[Euro]">0</heat_pump:
        cost_expansion_vessel>
40  <heat_pump:passive_cooling_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
        passive_cooling_possible>
41  <heat_pump:passive_cooling_with_ads uom="[1/0]">0</heat_pump:
        passive_cooling_with_ads>
42  <heat_pump:cost_ads_passive_cooling uom="[Euro]">0</heat_pump:
        cost_ads_passive_cooling>
43  <heat_pump:Q_cool_passive uom="[W]">0</heat_pump:Q_cool_passive
        >
44  <heat_pump:active_cooling_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
        active_cooling_possible>
45  <heat_pump:active_cooling_with_ads uom="[1/0]">0</heat_pump:
        active_cooling_with_ads>
46  <heat_pump:costs_ads_active_cooling uom="[Euro]">0</heat_pump:
```

```
                costs_ads_active_cooling>
47              <heat_pump:bivalent_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
                    bivalent_possible>
48              <heat_pump:cascade_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
                    cascade_possible>
49              <heat_pump:V_soil uom="[m3/h]">1.15</heat_pump:V_soil>
50              <heat_pump:soil_pump uom="[1/0]">1</heat_pump:soil_pump>
51              <heat_pump:Tmin_h uom="[°C]">15</heat_pump:Tmin_h>
52              <heat_pump:Tmax_h uom="[°C]">65</heat_pump:Tmax_h>
53              <heat_pump:Vmin_h uom="[m3/h]">0.47</heat_pump:Vmin_h>
54              <heat_pump:V_h_EN14511 uom="[m3/h]">0.78</heat_pump:
                    V_h_EN14511>
55              <heat_pump:IsInverter uom="[1/0]">0</heat_pump:IsInverter>
56              <heat_pump:subsidized uom="[1/0]">0</heat_pump:subsidized>
57          </heat_pump>
58          <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" index="1">
59          [...]
60          <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" index="22">
61              <heat_pump:name uom="">WPF 10 M</heat_pump:name>
62              <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15
                    288.15 293.15</heat_pump:heating_power_T>
63              <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15
                    288.15 293.15</heat_pump:compressor_power_T>
64              <heat_pump:Q_h_65 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    Q_h_65>
65              <heat_pump:Q_h_45 uom="W">8150.0 9460.0 10760.0 12060.0 13360.0
                    14660.0</heat_pump:Q_h_45>
66              <heat_pump:Q_h_75 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    Q_h_75>
67              <heat_pump:Q_h_60 uom="W">0.0 0.0 9740.0 10905.0 12070.0 13235.0</
                    heat_pump:Q_h_60>
68              <heat_pump:Q_h_40 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    Q_h_40>
69              <heat_pump:Q_h_50 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    Q_h_50>
70              <heat_pump:Q_h_55 uom="W">7660.0 8870.0 10080.0 11290.0 12500.0
                    13710.0</heat_pump:Q_h_55>
71              <heat_pump:Q_h_35 uom="W">8630.0 10020.0 11410.0 12800.0 14190.0
                    15580.0</heat_pump:Q_h_35>
72              <heat_pump:P_el_65 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    P_el_65>
73              <heat_pump:P_el_45 uom="W">2840.0 2840.0 2830.0 2820.0 2810.0 2800.0
                    </heat_pump:P_el_45>
74              <heat_pump:P_el_75 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    P_el_75>
75              <heat_pump:P_el_60 uom="W">0.0 0.0 3970.0 4005.0 4040.0 4075.0</
                    heat_pump:P_el_60>
76              <heat_pump:P_el_40 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    P_el_40>
77              <heat_pump:P_el_50 uom="W">0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</heat_pump:
                    P_el_50>
78              <heat_pump:P_el_55 uom="W">3630.0 3610.0 3590.0 3610.0 3630.0 3650.0
```

```
                </heat_pump:P_el_55>
79              <heat_pump:P_el_35 uom="W">2240.0 2230.0 2220.0 2210.0 2200.0 2190.0
                </heat_pump:P_el_35>
80              <heat_pump:T_brine uom="[K]">273.15</heat_pump:T_brine>
81              <heat_pump:T_VL uom="[°C]">35</heat_pump:T_VL>
82              <heat_pump:Q_h uom="[W]">10020</heat_pump:Q_h>
83              <heat_pump:P_el uom="[W]">2230</heat_pump:P_el>
84              <heat_pump:cost uom="[Euro]">8896</heat_pump:cost>
85              <heat_pump:proposed_storage uom="">SBP 200E</heat_pump:
                proposed_storage>
86              <heat_pump:volume_storage uom="[l]">207</heat_pump:volume_storage
                >
87              <heat_pump:cost_storage uom="[Euro]">917</heat_pump:cost_storage>
88              <heat_pump:losses_storage uom="[kWh/d]">1.1</heat_pump:
                losses_storage>
89              <heat_pump:proposed_dhw_storage uom="">SBB 300-1 Plus</
                heat_pump:proposed_dhw_storage>
90              <heat_pump:volume_dhw_storage uom="[l]">314</heat_pump:
                volume_dhw_storage>
91              <heat_pump:cost_dhw_storage uom="[Euro]">1392</heat_pump:
                cost_dhw_storage>
92              <heat_pump:losses_dhw_storage uom="[kWh/d]">1.7</heat_pump:
                losses_dhw_storage>
93              <heat_pump:Q_heating_element uom="[W]">6000</heat_pump:
                Q_heating_element>
94              <heat_pump:cost_heating_element uom="[Euro]">494</heat_pump:
                cost_heating_element>
95              <heat_pump:cost_pump uom="[Euro]">644</heat_pump:cost_pump>
96              <heat_pump:cost_expansion_vessel uom="[Euro]">0</heat_pump:
                cost_expansion_vessel>
97              <heat_pump:passive_cooling_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
                passive_cooling_possible>
98              <heat_pump:passive_cooling_with_ads uom="[1/0]">1</heat_pump:
                passive_cooling_with_ads>
99              <heat_pump:cost_ads_passive_cooling uom="[Euro]">736.5</heat_pump:
                cost_ads_passive_cooling>
100             <heat_pump:Q_cool_passive uom="[W]">undefined</heat_pump:
                Q_cool_passive>
101             <heat_pump:active_cooling_possible uom="[1/0]">0</heat_pump:
                active_cooling_possible>
102             <heat_pump:active_cooling_with_ads uom="[1/0]">1</heat_pump:
                active_cooling_with_ads>
103             <heat_pump:costs_ads_active_cooling uom="[Euro]">3321</heat_pump:
                costs_ads_active_cooling>
104             <heat_pump:bivalent_possible uom="[1/0]">1</heat_pump:
                bivalent_possible>
105             <heat_pump:cascade_possible uom="[1/0]">1</heat_pump:
                cascade_possible>
106             <heat_pump:V_soil uom="[m3/h]">2.2</heat_pump:V_soil>
107             <heat_pump:soil_pump uom="[1/0]">0</heat_pump:soil_pump>
108             <heat_pump:Tmin_h uom="[°C]">15</heat_pump:Tmin_h>
109             <heat_pump:Tmax_h uom="[°C]">60</heat_pump:Tmax_h>
```

```
110                     <heat_pump:Vmin_h uom="[m3/h]">0.85</heat_pump:Vmin_h>
111                     <heat_pump:V_h_EN14511 uom="[m3/h]">1.71</heat_pump:
                            V_h_EN14511>
112                     <heat_pump:IsInverter uom="[1/0]">0</heat_pump:IsInverter>
113                     <heat_pump:subsidized uom="[1/0]">0</heat_pump:subsidized>
114             </heat_pump>
115             [...]
116     </HPcollection>
117     <BoilerCollection>
118             <boiler xmlns:boiler ="URI-Boiler" index="0">
119                     <boiler:name uom="">Logano Plus KB 372 100</boiler:name>
120                     <boiler:nomHeatPower uom="[kW]">100</boiler:nomHeatPower>
121                     <boiler:eta uom="">0.98</boiler:eta>
122                     <boiler:cost uom="[Euro]">9025</boiler:cost>
123                     <boiler:proposedDHWstorage uom="">Logalux L200.3RS-B</boiler:
                            proposedDHWstorage>
124                     <boiler:LossesProposedDHWstorage uom="[kWh/d]">1.42</boiler:
                            LossesProposedDHWstorage>
125                     <boiler:CostsProposedDHWstorage uom="[Euro]">2410.08</boiler:
                            CostsProposedDHWstorage>
126                     <boiler:VolumeProposedDHWstorage uom="[m^3]">200</boiler:
                            VolumeProposedDHWstorage>
127                     <boiler:CostCirculatingPump uom="[Euro]">866</boiler:
                            CostCirculatingPump>
128             </boiler>
129             [...]
130     </BoilerCollection>
131     <StorageCollection>
132             <bufferStorageCollection>
133                     <bufferStorage xmlns:bufferStorage="URI-bufferStorage" index="0">
134                             <bufferStorage:name uom="">SBP 1500 E</bufferStorage:name>
135                             <bufferStorage:type uom="">Pufferspeicher</bufferStorage:type>
136                             <bufferStorage:cooling_possible uom="">0</bufferStorage:
                                    cooling_possible>
137                             <bufferStorage:volume uom="[m^3]">1.503</bufferStorage:volume>
138                             <bufferStorage:heating_loss uom="[kWh/d]">4.1</bufferStorage:
                                    heating_loss>
139                             <bufferStorage:cost uom="[Euro]">1986.0</bufferStorage:cost>
140                             <bufferStorage:cost_wdh uom="[Euro]">961</bufferStorage:
                                    cost_wdh>
141                     </bufferStorage>
142                     [...]
143             </bufferStorageCollection>
144             <dhwStorageCollection>
145                     <dhwStorage xmlns:dhwStorage="URI-dhwStorage" index="17">
146                             <dhwStorage:name uom="">SBB 1000 WP SOL</dhwStorage:
                                    name>
147                             <dhwStorage:type uom="">Warmwasserspeicher</dhwStorage:type
                                    >
148                             <dhwStorage:cooling_possible uom="">0</dhwStorage:
                                    cooling_possible>
149                             <dhwStorage:volume uom="[m^3]">0.835</dhwStorage:volume>
```

```
150                                 <dhwStorage:heating_loss uom="[kWh/d]">3.4</dhwStorage:
                                        heating_loss>
151                                 <dhwStorage:cost uom="[Euro]">4920.0</dhwStorage:cost>
152                                 <dhwStorage:cost_wdh uom="[Euro]">829</dhwStorage:cost_wdh
                                        >
153                             </dhwStorage>
154                             [...]
155                     </dhwStorageCollection>
156             </StorageCollection>
157 </Collection>
```

D.3. Zusätzliche Informationen der Systemvergleiche

Zusätzliche Informationen

	Einheit	Monovalent	Monoenergetisch	Bivalent parallel	Gas
Wärmepumpe / Leistung	[-]	WPF 13 M / 12,98 kW	WPC 07 / 7,5 kW	WPF 10 M / 10,02 kW	--
Sekundärerzeuger / Leistung	[-]	--	Heizelement / 8.8 kW	Logano plus KB192i-15 / 15 kW	Logano plus KB192i-15 / 15 kW
Jahresnutzenergiebedarf	[kWh/a]	19903	19903	19903	19903
Verluste	[kWh/a]	861	204	1244	623
SCOP/Wirkungsgrad	[-]	4,515	4,523	4,439 / 0,93	0,93
Jahresendenergiebedarf Strom	[kWh/a]	4599	4445	4764	0
Jahresendenergiebedarf Gas	[kWh/a]	0	0	0	22071
Primärenergiebedarf des ersten Jahres	[kWh]	8278	8001	8576	24278
Primärenergiebedarf über 50 Jahre	[kWh]	413913	400056	428791	1213905
Energiekosten des ersten Jahres	[€]	1765	1711	1983	4795
Energiekosten über 50 Jahre	[€]	143895	139337	156789	530807
Investitionskosten abzgl. Förderung	[€]	59397	53089	66548	44852
CO2-Emissionen des ersten Jahres	[t]	1,683	1,627	1,744	4,436
CO2-Emissionen über 50 Jahre	[t]	84,162	81,345	87,187	221,814
Kosten für CO2-Emissionen des ersten Jahres	[€]	0	0	0	155
Kosten für CO2-Emissionen über 50 Jahre	[€]	0	0	0	234632

Ok

Abb. D.1.: Screenshot der zusätzlichen Informationen der Systemvergleiche von GeoWPSys+Web

D.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Übersicht über die Stromkosten

Jahr	Strom-Preis	Jahr	Strom-Preis
2022	35	2048	58,57
2023	35,7	2049	59,74
2024	36,41	2050	60,94
2025	37,14	2051	62,15
2026	37,89	2052	63,4
2027	38,64	2053	64,67
2028	39,42	2054	65,96
2029	40,2	2055	67,28
2030	41,01	2056	68,62
2031	41,83	2057	70
2032	42,66	2058	71,4
2033	43,52	2059	72,82
2034	44,39	2060	74,28
2035	45,28	2061	75,77
2036	46,18	2062	77,28
2037	47,11	2063	78,83
2038	48,05	2064	80,4
2039	49,01	2065	82,01
2040	49,99	2066	83,65
2041	50,99	2067	85,32
2042	52,01	2068	87,03
2043	53,05	2069	88,77
2044	54,11	2070	90,55
2045	55,19	2071	92,36
2046	56,3	2072	94,21
2047	57,42		

Ok

Abb. D.2.: Screenshot der Strompreistabelle innerhalb der Wirtschaftlichkeitseingaben von GeoWPSys+Web

Übersicht über den CO2-Preis

Jahr	CO2-Preis	Jahr	CO2-Preis
2022	30	2048	492,49
2023	35	2049	541,74
2024	45	2050	595,91
2025	55	2051	655,5
2026	60,5	2052	721,05
2027	66,55	2053	793,15
2028	73,21	2054	872,47
2029	80,53	2055	959,72
2030	88,58	2056	1055,69
2031	97,44	2057	1161,26
2032	107,18	2058	1277,38
2033	117,9	2059	1405,12
2034	129,69	2060	1545,63
2035	142,66	2061	1700,2
2036	156,92	2062	1870,22
2037	172,61	2063	2057,24
2038	189,87	2064	2262,96
2039	208,86	2065	2489,26
2040	229,75	2066	2738,18
2041	252,72	2067	3012
2042	278	2068	3313,2
2043	305,8	2069	3644,52
2044	336,37	2070	4008,98
2045	370,01	2071	4409,87
2046	407,01	2072	4850,86
2047	447,72		

Ok

Abb. D.3.: Screenshot der CO_2-Preistabelle innerhalb der Wirtschaftlichkeitseingaben von GeoWPSys+Web

D.5. Prozentuale Aufteilung der Darstellung im Netzdiagramm

Tab. D.9.: Bewertung der Amortisation als Teilaspekt der Wirtschaftlichkeitsbewertung für das Netzdiagramm von GeoWPSys+Web

Amortisationszeitpunkte	Wert im Netzdiagramm
x $\leq$ 5 Jahre	5
5 Jahre $<$ x $\leq$ 10 Jahre	4
10 Jahre $<$ x $\leq$ 15 Jahre	3
15 Jahre $<$ x $\leq$ 20 Jahre	2
20 Jahre $<$ x $\leq$ 50 Jahre	1
Kleinster Kapitalwert nach 50 Jahren / keine Amortisation zum Vergleichssystem	0

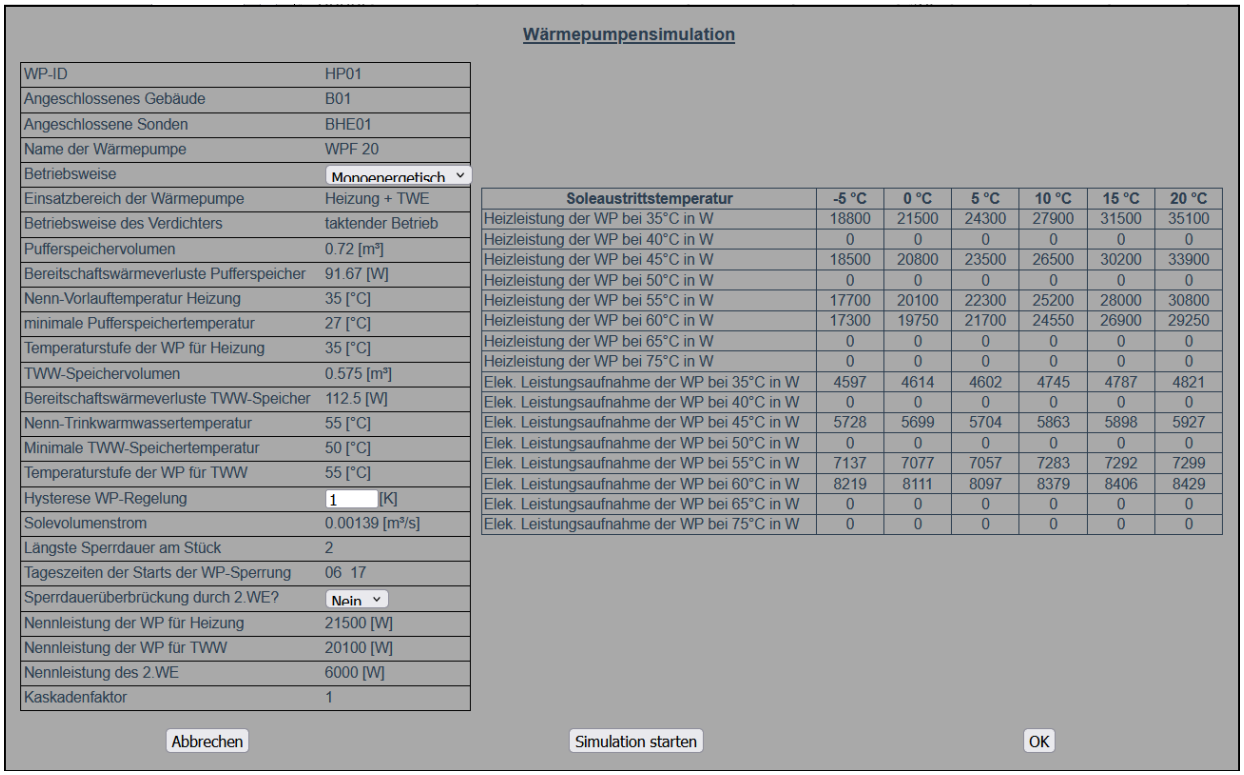
x = Systeme, die nicht die schnellste Amortisation oder den kleinsten Kapitalwert haben.

Tab. D.10.: Aufteilung der Netzdiagrammskala von GeoWPSys+Web für den Platzbedarf der Systeme

Systemvariante	Wert im Netzdiagramm
Gasbrennwertsystem	5
EWS (Energiepfähle, . . .) + WP monovalent und monoenergetisch	4,5
EWS (Energie-Pfähle, . . .) + WP bivalent	4
Andere geothermische Quellenanlagen (Erdwärmekorb, Ringgrabenkollektoren, ...) + WP monovalent und monoenergetisch	3,5
Andere geothermische Quellenanlagen (Erdwärmekorb, Ringgrabenkollektoren, ...) + WP bivalent	3
EWK + WP monovalent und monoenergetisch	2,5
EWK + WP bivalent	2
Fernwärme	1
–	0

WP = Wärmepumpe; EWS = Erdwärmesonde; EWK = Erdwärmekollektor

D.6. Wärmepumpensimulation



Wärmepumpensimulation

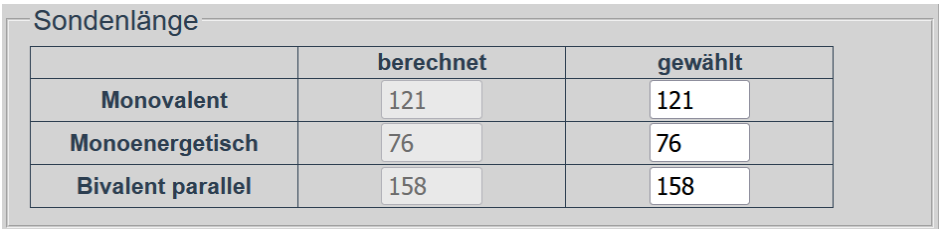
WP-ID	HP01
Angeschlossenes Gebäude	B01
Angeschlossene Sonden	BHE01
Name der Wärmepumpe	WPF 20
Betriebsweise	Monoenergetisch
Einsatzbereich der Wärmepumpe	Heizung + TWE
Betriebsweise des Verdichters	taktender Betrieb
Pufferspeichervolumen	0.72 [m³]
Bereitschaftswärmeverluste Pufferspeicher	91.67 [W]
Nenn-Vorlauftemperatur Heizung	35 [°C]
minimale Pufferspeichertemperatur	27 [°C]
Temperaturstufe der WP für Heizung	35 [°C]
TWW-Speichervolumen	0.575 [m³]
Bereitschaftswärmeverluste TWW-Speicher	112.5 [W]
Nenn-Trinkwarmwassertemperatur	55 [°C]
Minimale TWW-Speichertemperatur	50 [°C]
Temperaturstufe der WP für TWW	55 [°C]
Hysterese WP-Regelung	1 [K]
Solevolumenstrom	0.00139 [m³/s]
Längste Sperrdauer am Stück	2
Tageszeiten der Starts der WP-Sperrung	06 17
Sperrdauerüberbrückung durch 2.WE?	Nein
Nennleistung der WP für Heizung	21500 [W]
Nennleistung der WP für TWW	20100 [W]
Nennleistung des 2.WE	6000 [W]
Kaskadenfaktor	1

Soleaustrittstemperatur	-5 °C	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
Heizleistung der WP bei 35°C in W	18800	21500	24300	27900	31500	35100
Heizleistung der WP bei 40°C in W	0	0	0	0	0	0
Heizleistung der WP bei 45°C in W	18500	20800	23500	26500	30200	33900
Heizleistung der WP bei 50°C in W	0	0	0	0	0	0
Heizleistung der WP bei 55°C in W	17700	20100	22300	25200	28000	30800
Heizleistung der WP bei 60°C in W	17300	19750	21700	24550	26900	29250
Heizleistung der WP bei 65°C in W	0	0	0	0	0	0
Heizleistung der WP bei 75°C in W	0	0	0	0	0	0
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 35°C in W	4597	4614	4602	4745	4787	4821
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 40°C in W	0	0	0	0	0	0
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 45°C in W	5728	5699	5704	5863	5898	5927
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 50°C in W	0	0	0	0	0	0
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 55°C in W	7137	7077	7057	7283	7292	7299
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 60°C in W	8219	8111	8097	8379	8406	8429
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 65°C in W	0	0	0	0	0	0
Elek. Leistungsaufnahme der WP bei 75°C in W	0	0	0	0	0	0

Abbrechen | Simulation starten | OK

Abb. D.4.: Wärmepumpensimulationsfenster in GeoWPSys+Web

D.7. Quellendimensionierung



Sondenlänge

	berechnet	gewählt
Monovalent	121	121
Monoenergetisch	76	76
Bivalent parallel	158	158

Abb. D.5.: Ansicht der berechneten und ausgewählten Erdwärmesondenlänge in GeoWPSys+Web

Anhang E.

Zusätzliche Funktionen von GeoWPSys+

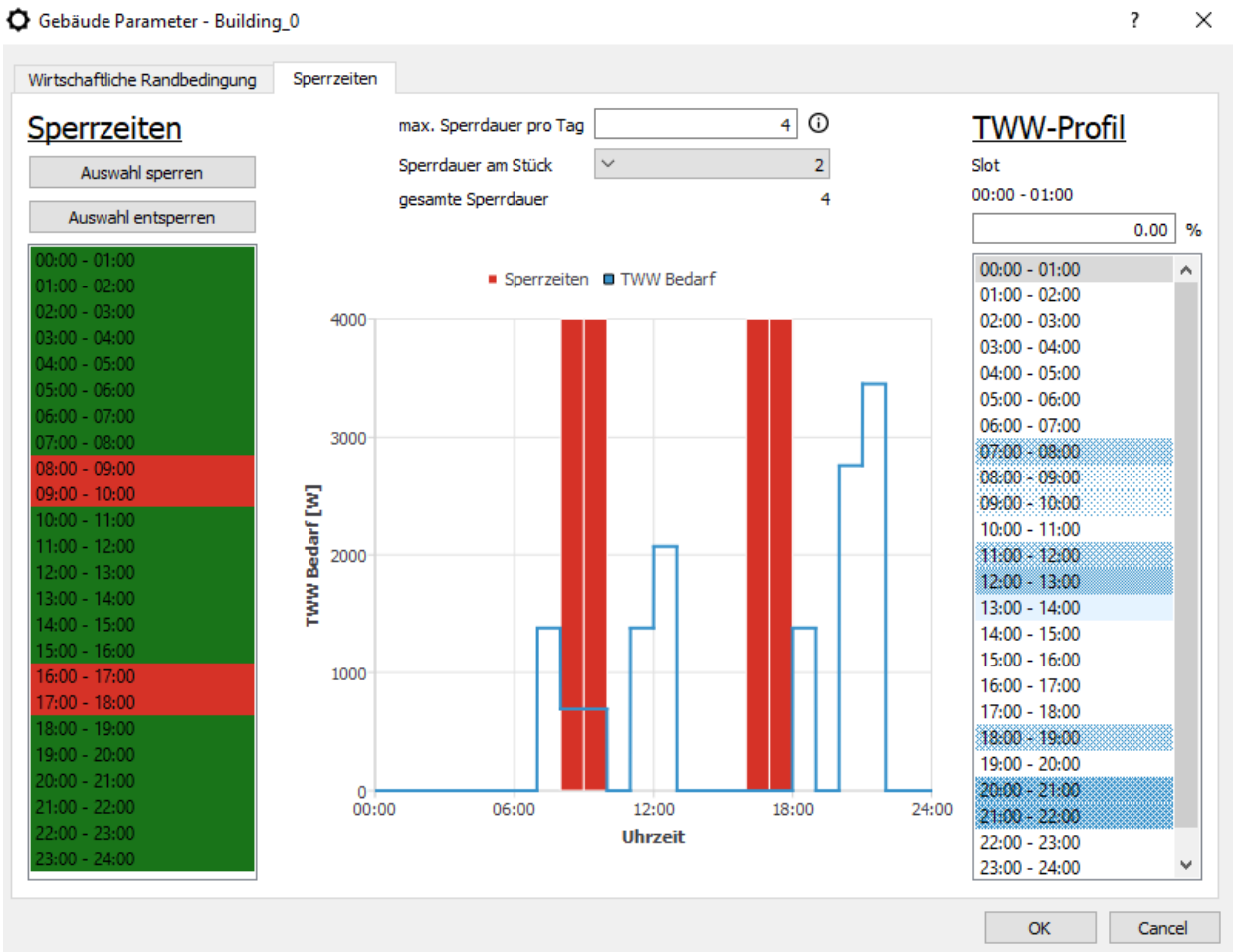


Abb. E.1.: Fenster zur Spezifikation von Sperrzeiten und TWW-Zapfprofilen in GeoWPSys+

Anhang F.

Demonstration

F.1. XML-Datei des Fallbeispiels

```
<getisData xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml/3.2" version="1.08">
    <ClimateCollection>
        <climate xmlns:climate="URI-Climate" climate:id="a1">
            <climate:center_of_x>3760500</climate:center_of_x>
            <climate:center_of_y>5600000</climate:center_of_y>
            <climate:air_temperature time_interval="3600" uom="K">275.95 274.75 273.95 273.95
                274.05 [...] 278.35 277.35</climate:air_temperature>
        </climate>
    </ClimateCollection>
    <HeatPumpCollection>
        <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP01">
            <heat_pump:linked_buildings>660431</heat_pump:linked_buildings>
            <heat_pump:name>WPC 05 / WPC 05 cool</heat_pump:name>
            <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
            <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
            <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
            <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.7</heat_pump:volume_storage>
            <heat_pump:static_loss_storage uom="W">91.66666666666667</heat_pump:
                static_loss_storage>
            <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.4</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
            <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">112.5</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
            <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
            <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
            <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
            <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
            <heat_pump:Tmax_h uom="K">348.15</heat_pump:Tmax_h>
            <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">3.917e-4</heat_pump:V_soil>
            <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
            <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
            <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
            <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
```

```
30          <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">5010 5820 6540 7260 7980 8700 </heat_pump:
                Q_h_W35>
31          <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
32          <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">4740 5470 6230 6990 7750 8510 </heat_pump:
                Q_h_W45>
33          <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
34          <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">4500 5190 5940 6690 7440 8190 </heat_pump:
                Q_h_W55>
35          <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 5050 5795 6540 7285 8030 </heat_pump:
                Q_h_W60>
36          <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
37          <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
38          <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
39          <heat_pump:P_el_W35 uom="W">1220 1210 1220 1230 1240 1250 </heat_pump:
                P_el_W35>
40          <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
41          <heat_pump:P_el_W45 uom="W">1520 1520 1540 1560 1580 1600 </heat_pump:
                P_el_W45>
42          <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
43          <heat_pump:P_el_W55 uom="W">1840 1850 1860 1870 1880 1890 </heat_pump:
                P_el_W55>
44          <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 2015 2020 2073 2127 2180 </heat_pump:
                P_el_W60>
45          <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 2381 2426 2462 2502 2539 </heat_pump:
                P_el_W65>
46          <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
47          <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">0</heat_pump:P_el_soil_pump>
48          <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
49      </heat_pump>
50      <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP02">
51          <heat_pump:linked_buildings>656408</heat_pump:linked_buildings>
52          <heat_pump:name>WPF 10 M</heat_pump:name>
53          <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
54          <heat_pump:application_range>0</heat_pump:application_range>
55          <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
56          <heat_pump:volume_storage uom="m^3">1</heat_pump:volume_storage>
57          <heat_pump:static_loss_storage uom="W">154.16666666666666</heat_pump:
                static_loss_storage>
58          <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">undefined</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
59          <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">undefined</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
60          <heat_pump:T_dhw uom="K">undefined</heat_pump:T_dhw>
61          <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmin_dhw>
62          <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmax_dhw>
63          <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
64          <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
65          <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">6.111e-4</heat_pump:V_soil>
66          <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
67          <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
68          <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
```

```
            Tmax_soil_in>
69          <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
70          <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">8630 10020 11410 12800 14190 15580 </heat_pump
                :Q_h_W35>
71          <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
72          <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">8150 9460 10760 12060 13360 14660 </heat_pump:
                Q_h_W45>
73          <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
74          <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">7660 8870 10080 11290 12500 13710 </heat_pump:
                Q_h_W55>
75          <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 9740 10905 12070 13235 </heat_pump:
                Q_h_W60>
76          <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
77          <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
78          <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
79          <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2240 2230 2220 2210 2200 2190 </heat_pump:
                P_el_W35>
80          <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
81          <heat_pump:P_el_W45 uom="W">2840 2840 2830 2820 2810 2800 </heat_pump:
                P_el_W45>
82          <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
83          <heat_pump:P_el_W55 uom="W">3630 3610 3590 3610 3630 3650 </heat_pump:
                P_el_W55>
84          <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 3970 4005 4040 4075 </heat_pump:P_el_W60
                >
85          <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
86          <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
87          <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
88          <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
89      </heat_pump>
90      <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP03">
91          <heat_pump:linked_buildings>655518</heat_pump:linked_buildings>
92          <heat_pump:name>WPF 10 M</heat_pump:name>
93          <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
94          <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
95          <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
96          <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.4</heat_pump:volume_storage>
97          <heat_pump:static_loss_storage uom="W">83.33333333333333</heat_pump:
                static_loss_storage>
98          <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.3</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
99          <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">100</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
100         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
101         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
102         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
103         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
104         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
105         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">6.111e-4</heat_pump:V_soil>
106         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
```

```
107         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
108         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
109         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
110         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">8630 10020 11410 12800 14190 15580 </heat_pump
                :Q_h_W35>
111         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
112         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">8150 9460 10760 12060 13360 14660 </heat_pump:
                Q_h_W45>
113         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
114         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">7660 8870 10080 11290 12500 13710 </heat_pump:
                Q_h_W55>
115         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 9740 10905 12070 13235 </heat_pump:
                Q_h_W60>
116         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
117         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
118         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
119         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2240 2230 2220 2210 2200 2190 </heat_pump:
                P_el_W35>
120         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
121         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">2840 2840 2830 2820 2810 2800 </heat_pump:
                P_el_W45>
122         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
123         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">3630 3610 3590 3610 3630 3650 </heat_pump:
                P_el_W55>
124         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 3970 4005 4040 4075 </heat_pump:P_el_W60
                >
125         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
126         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
127         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
128         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
129     </heat_pump>
130     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP04">
131         <heat_pump:linked_buildings>000011</heat_pump:linked_buildings>
132         <heat_pump:name>WPC 04 / WPC 04 cool</heat_pump:name>
133         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
134         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
135         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
136         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.4</heat_pump:volume_storage>
137         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">83.33333333333333</heat_pump:
                static_loss_storage>
138         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.29</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
139         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">104.16666666666667</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
140         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
141         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
142         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
143         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
144         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
```

```
145         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">3.194e-4</heat_pump:V_soil>
146         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
147         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
148         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
149         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
150         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">4080 4770 5380 5990 6600 7210 </heat_pump:
                Q_h_W35>
151         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
152         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">3870 4360 5000 5640 6280 6920 </heat_pump:
                Q_h_W45>
153         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
154         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">3700 4250 4800 5350 5900 6450 </heat_pump:
                Q_h_W55>
155         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 4195 4700 5205 5767 6300 </heat_pump:
                Q_h_W60>
156         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
157         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
158         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
159         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">1050 1060 1050 1040 1030 1020 </heat_pump:
                P_el_W35>
160         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
161         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">1290 1300 1310 1320 1330 1340 </heat_pump:
                P_el_W45>
162         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
163         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">1570 1560 1580 1600 1620 1640 </heat_pump:
                P_el_W55>
164         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 1690 1715 1747 1778 1810 </heat_pump:
                P_el_W60>
165         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 2050 2022 2000 1981 2032 </heat_pump:
                P_el_W65>
166         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
167         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">0</heat_pump:P_el_soil_pump>
168         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
169     </heat_pump>
170     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP05">
171         <heat_pump:linked_buildings>655122</heat_pump:linked_buildings>
172         <heat_pump:name>WPF 10 M</heat_pump:name>
173         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
174         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
175         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
176         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.4</heat_pump:volume_storage>
177         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">83.33333333333333</heat_pump:
                static_loss_storage>
178         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.29</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
179         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">104.16666666666667</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
180         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
181         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
```

```
182         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
183         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
184         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
185         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">6.111e-4</heat_pump:V_soil>
186         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
187         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
188         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
189         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
190         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">8630 10020 11410 12800 14190 15580 </heat_pump
                :Q_h_W35>
191         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
192         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">8150 9460 10760 12060 13360 14660 </heat_pump:
                Q_h_W45>
193         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
194         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">7660 8870 10080 11290 12500 13710 </heat_pump:
                Q_h_W55>
195         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 9740 10905 12070 13235 </heat_pump:
                Q_h_W60>
196         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
197         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
198         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
199         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2240 2230 2220 2210 2200 2190 </heat_pump:
                P_el_W35>
200         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
201         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">2840 2840 2830 2820 2810 2800 </heat_pump:
                P_el_W45>
202         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
203         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">3630 3610 3590 3610 3630 3650 </heat_pump:
                P_el_W55>
204         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 3970 4005 4040 4075 </heat_pump:P_el_W60
                >
205         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
206         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
207         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
208         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
209     </heat_pump>
210     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP06">
211         <heat_pump:linked_buildings>655131</heat_pump:linked_buildings>
212         <heat_pump:name>WPF 10 M</heat_pump:name>
213         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
214         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
215         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
216         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.4</heat_pump:volume_storage>
217         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">83.33333333333333</heat_pump:
                static_loss_storage>
218         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.3</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
219         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">100</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
```

```
220         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
221         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
222         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
223         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
224         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
225         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">6.111e-4</heat_pump:V_soil>
226         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
227         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
228         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
229         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
230         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">8630 10020 11410 12800 14190 15580 </heat_pump
                :Q_h_W35>
231         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
232         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">8150 9460 10760 12060 13360 14660 </heat_pump:
                Q_h_W45>
233         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
234         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">7660 8870 10080 11290 12500 13710 </heat_pump:
                Q_h_W55>
235         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 9740 10905 12070 13235 </heat_pump:
                Q_h_W60>
236         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
237         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
238         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
239         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2240 2230 2220 2210 2200 2190 </heat_pump:
                P_el_W35>
240         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
241         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">2840 2840 2830 2820 2810 2800 </heat_pump:
                P_el_W45>
242         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
243         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">3630 3610 3590 3610 3630 3650 </heat_pump:
                P_el_W55>
244         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 3970 4005 4040 4075 </heat_pump:P_el_W60
                >
245         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
246         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
247         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
248         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
249     </heat_pump>
250     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP07">
251         <heat_pump:linked_buildings>657864</heat_pump:linked_buildings>
252         <heat_pump:name>WPC 05 / WPC 05 cool</heat_pump:name>
253         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
254         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
255         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
256         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.7</heat_pump:volume_storage>
257         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">91.66666666666667</heat_pump:
                static_loss_storage>
258         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.4</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
```

```
259         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">112.5</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
260         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
261         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
262         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
263         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
264         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
265         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">3.917e-4</heat_pump:V_soil>
266         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
267         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
268         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
269         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
270         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">5010 5820 6540 7260 7980 8700 </heat_pump:
                Q_h_W35>
271         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
272         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">4740 5470 6230 6990 7750 8510 </heat_pump:
                Q_h_W45>
273         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
274         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">4500 5190 5940 6690 7440 8190 </heat_pump:
                Q_h_W55>
275         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 5050 5795 6540 7285 8030 </heat_pump:
                Q_h_W60>
276         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
277         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
278         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
279         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">1220 1210 1220 1230 1240 1250 </heat_pump:
                P_el_W35>
280         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
281         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">1520 1520 1540 1560 1580 1600 </heat_pump:
                P_el_W45>
282         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
283         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">1840 1850 1860 1870 1880 1890 </heat_pump:
                P_el_W55>
284         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 2015 2020 2073 2127 2180 </heat_pump:
                P_el_W60>
285         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 2381 2426 2462 2502 2539 </heat_pump:
                P_el_W65>
286         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
287         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">0</heat_pump:P_el_soil_pump>
288         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
289     </heat_pump>
290     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP08">
291         <heat_pump:linked_buildings>661433</heat_pump:linked_buildings>
292         <heat_pump:name>WPF 13 M</heat_pump:name>
293         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
294         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
295         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
296         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.7</heat_pump:volume_storage>
297         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">91.66666666666667</heat_pump:
```

```
                static_loss_storage>
298             <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.5</heat_pump:
                    volume_storage_dhw>
299             <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">120.83333333333333</heat_pump:
                    static_loss_storage_dhw>
300             <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
301             <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
302             <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
303             <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
304             <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
305             <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">8.611e-4</heat_pump:V_soil>
306             <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
307             <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
308             <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                    Tmax_soil_in>
309             <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                    heat_pump:heating_power_T>
310             <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">11210 12980 14750 16520 18290 20060 </
                    heat_pump:Q_h_W35>
311             <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
312             <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">10680 12490 14120 15750 17380 19010 </
                    heat_pump:Q_h_W45>
313             <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
314             <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">10430 11990 13550 15110 16670 18230 </
                    heat_pump:Q_h_W55>
315             <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 13265 14790 16315 17840 </heat_pump:
                    Q_h_W60>
316             <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
317             <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
318             <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                    </heat_pump:compressor_power_T>
319             <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2860 2840 2820 2800 2780 2760 </heat_pump:
                    P_el_W35>
320             <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
321             <heat_pump:P_el_W45 uom="W">3600 3590 3600 3610 3620 3630 </heat_pump:
                    P_el_W45>
322             <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
323             <heat_pump:P_el_W55 uom="W">4600 4570 4540 4510 4480 4450 </heat_pump:
                    P_el_W55>
324             <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 5010 4960 4910 4860 </heat_pump:P_el_W60
                    >
325             <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
326             <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
327             <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
328             <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
329         </heat_pump>
330         <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP09">
331             <heat_pump:linked_buildings>658081</heat_pump:linked_buildings>
332             <heat_pump:name>WPF 5 / WPF 5 cool</heat_pump:name>
333             <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
334             <heat_pump:application_range>0</heat_pump:application_range>
335             <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
```

```
336         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.4</heat_pump:volume_storage>
337         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">83.33333333333333</heat_pump:
                static_loss_storage>
338         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">undefined</heat_pump:
                volume_storage_dhw>
339         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">undefined</heat_pump:
                static_loss_storage_dhw>
340         <heat_pump:T_dhw uom="K">undefined</heat_pump:T_dhw>
341         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmin_dhw>
342         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmax_dhw>
343         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
344         <heat_pump:Tmax_h uom="K">338.15</heat_pump:Tmax_h>
345         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">3.917e-4</heat_pump:V_soil>
346         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
347         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
348         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                Tmax_soil_in>
349         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                heat_pump:heating_power_T>
350         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">5010 5820 6540 7260 7980 8700 </heat_pump:
                Q_h_W35>
351         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
352         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">4740 5470 6230 6990 7750 8510 </heat_pump:
                Q_h_W45>
353         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
354         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">4500 5190 5940 6690 7440 8190 </heat_pump:
                Q_h_W55>
355         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 5050 5795 6540 7285 8030 </heat_pump:
                Q_h_W60>
356         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
357         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
358         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                </heat_pump:compressor_power_T>
359         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">1220 1210 1220 1230 1240 1250 </heat_pump:
                P_el_W35>
360         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
361         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">1520 1520 1540 1560 1580 1600 </heat_pump:
                P_el_W45>
362         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
363         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">1840 1850 1860 1870 1880 1890 </heat_pump:
                P_el_W55>
364         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 2015 2020 2073 2127 2180 </heat_pump:
                P_el_W60>
365         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 2381 2426 2462 2502 2539 </heat_pump:
                P_el_W65>
366         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
367         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">0</heat_pump:P_el_soil_pump>
368         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
369     </heat_pump>
370     <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP10">
371         <heat_pump:linked_buildings>656420</heat_pump:linked_buildings>
372         <heat_pump:name>WPF 13 M</heat_pump:name>
```

```
373             <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
374             <heat_pump:application_range>0</heat_pump:application_range>
375             <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
376             <heat_pump:volume_storage uom="m^3">0.7</heat_pump:volume_storage>
377             <heat_pump:static_loss_storage uom="W">91.66666666666667</heat_pump:
                    static_loss_storage>
378             <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">undefined</heat_pump:
                    volume_storage_dhw>
379             <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">undefined</heat_pump:
                    static_loss_storage_dhw>
380             <heat_pump:T_dhw uom="K">undefined</heat_pump:T_dhw>
381             <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmin_dhw>
382             <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">undefined</heat_pump:Tmax_dhw>
383             <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
384             <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
385             <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">8.611e-4</heat_pump:V_soil>
386             <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
387             <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
388             <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                    Tmax_soil_in>
389             <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                    heat_pump:heating_power_T>
390             <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">11210 12980 14750 16520 18290 20060 </
                    heat_pump:Q_h_W35>
391             <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
392             <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">10680 12490 14120 15750 17380 19010 </
                    heat_pump:Q_h_W45>
393             <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
394             <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">10430 11990 13550 15110 16670 18230 </
                    heat_pump:Q_h_W55>
395             <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 13265 14790 16315 17840 </heat_pump:
                    Q_h_W60>
396             <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
397             <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
398             <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                    </heat_pump:compressor_power_T>
399             <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2860 2840 2820 2800 2780 2760 </heat_pump:
                    P_el_W35>
400             <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
401             <heat_pump:P_el_W45 uom="W">3600 3590 3600 3610 3620 3630 </heat_pump:
                    P_el_W45>
402             <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
403             <heat_pump:P_el_W55 uom="W">4600 4570 4540 4510 4480 4450 </heat_pump:
                    P_el_W55>
404             <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 5010 4960 4910 4860 </heat_pump:P_el_W60
                    >
405             <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
406             <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
407             <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
408             <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
409         </heat_pump>
410         <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP11">
```

```
411         <heat_pump:linked_buildings>658285</heat_pump:linked_buildings>
412         <heat_pump:name>WPF 10 M</heat_pump:name>
413         <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
414         <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
415         <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
416         <heat_pump:volume_storage uom="m^3">1</heat_pump:volume_storage>
417         <heat_pump:static_loss_storage uom="W">154.16666666666666</heat_pump:
              static_loss_storage>
418         <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">0.4</heat_pump:
              volume_storage_dhw>
419         <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">112.5</heat_pump:
              static_loss_storage_dhw>
420         <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
421         <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
422         <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
423         <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
424         <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
425         <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">6.111e-4</heat_pump:V_soil>
426         <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
427         <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
428         <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
              Tmax_soil_in>
429         <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
              heat_pump:heating_power_T>
430         <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">8630 10020 11410 12800 14190 15580 </heat_pump
              :Q_h_W35>
431         <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
432         <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">8150 9460 10760 12060 13360 14660 </heat_pump:
              Q_h_W45>
433         <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
434         <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">7660 8870 10080 11290 12500 13710 </heat_pump:
              Q_h_W55>
435         <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 9740 10905 12070 13235 </heat_pump:
              Q_h_W60>
436         <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W65>
437         <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W75>
438         <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
              </heat_pump:compressor_power_T>
439         <heat_pump:P_el_W35 uom="W">2240 2230 2220 2210 2200 2190 </heat_pump:
              P_el_W35>
440         <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
441         <heat_pump:P_el_W45 uom="W">2840 2840 2830 2820 2810 2800 </heat_pump:
              P_el_W45>
442         <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
443         <heat_pump:P_el_W55 uom="W">3630 3610 3590 3610 3630 3650 </heat_pump:
              P_el_W55>
444         <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 3970 4005 4040 4075 </heat_pump:P_el_W60
              >
445         <heat_pump:P_el_W65 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W65>
446         <heat_pump:P_el_W75 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W75>
447         <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
448         <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
```

```
449         </heat_pump>
450         <heat_pump xmlns:heat_pump="URI-HeatPump" heat_pump:id="HP12">
451             <heat_pump:linked_buildings>660687</heat_pump:linked_buildings>
452             <heat_pump:name>WPF 27 HT</heat_pump:name>
453             <heat_pump:operating_mode>0</heat_pump:operating_mode>
454             <heat_pump:application_range>2</heat_pump:application_range>
455             <heat_pump:compressor_mode>0</heat_pump:compressor_mode>
456             <heat_pump:volume_storage uom="m^3">1.5</heat_pump:volume_storage>
457             <heat_pump:static_loss_storage uom="W">187.5</heat_pump:static_loss_storage>
458             <heat_pump:volume_storage_dhw uom="m^3">1</heat_pump:volume_storage_dhw
                    >
459             <heat_pump:static_loss_storage_dhw uom="W">179.16666666666666</heat_pump:
                    static_loss_storage_dhw>
460             <heat_pump:T_dhw uom="K">328.15</heat_pump:T_dhw>
461             <heat_pump:Tmin_dhw uom="K">323.15</heat_pump:Tmin_dhw>
462             <heat_pump:Tmax_dhw uom="K">328.15</heat_pump:Tmax_dhw>
463             <heat_pump:Tmin_h uom="K">288.15</heat_pump:Tmin_h>
464             <heat_pump:Tmax_h uom="K">333.15</heat_pump:Tmax_h>
465             <heat_pump:V_soil uom="m^3/s">1.875e-3</heat_pump:V_soil>
466             <heat_pump:Tsoil_cellcrit uom="K">273.15</heat_pump:Tsoil_cellcrit>
467             <heat_pump:Tmin_soil_in uom="K">265.45</heat_pump:Tmin_soil_in>
468             <heat_pump:Tmax_soil_in uom="K">288.54999999999995</heat_pump:
                    Tmax_soil_in>
469             <heat_pump:heating_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15</
                    heat_pump:heating_power_T>
470             <heat_pump:Q_h_W35 uom="W">23640 27410 31180 34950 38720 42490 </
                    heat_pump:Q_h_W35>
471             <heat_pump:Q_h_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W40>
472             <heat_pump:Q_h_W45 uom="W">23030 26240 29990 33740 37490 41240 </
                    heat_pump:Q_h_W45>
473             <heat_pump:Q_h_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W50>
474             <heat_pump:Q_h_W55 uom="W">21150 25100 29050 33000 36950 40900 </
                    heat_pump:Q_h_W55>
475             <heat_pump:Q_h_W60 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:Q_h_W60>
476             <heat_pump:Q_h_W65 uom="W">19270 23960 28110 32260 36410 40560 </
                    heat_pump:Q_h_W65>
477             <heat_pump:Q_h_W75 uom="W">17390 22820 27170 31520 35870 40220 </
                    heat_pump:Q_h_W75>
478             <heat_pump:compressor_power_T uom="K">268.15 273.15 278.15 283.15 288.15 293.15
                    </heat_pump:compressor_power_T>
479             <heat_pump:P_el_W35 uom="W">6130 6320 6510 6700 6890 7080 </heat_pump:
                    P_el_W35>
480             <heat_pump:P_el_W40 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W40>
481             <heat_pump:P_el_W45 uom="W">7100 7410 7650 7890 8130 8370 </heat_pump:
                    P_el_W45>
482             <heat_pump:P_el_W50 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W50>
483             <heat_pump:P_el_W55 uom="W">8080 8490 8900 9310 9720 10130 </heat_pump:
                    P_el_W55>
484             <heat_pump:P_el_W60 uom="W">0 0 0 0 0 0 </heat_pump:P_el_W60>
485             <heat_pump:P_el_W65 uom="W">9060 9570 10150 10730 11310 11890 </heat_pump:
                    P_el_W65>
486             <heat_pump:P_el_W75 uom="W">10040 10650 11400 12150 12900 13650 </
```

```
                heat_pump:P_el_W75>
487             <heat_pump:P_el_soil_pump uom="W">50</heat_pump:P_el_soil_pump>
488             <heat_pump:const_COP>4</heat_pump:const_COP>
489         </heat_pump>
490     </HeatPumpCollection>
491     <BuildingCollection>
492         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="660431">
493             <building:linked_heat_pump>HP01</building:linked_heat_pump>
494             <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
495             <building:which_HL>1</building:which_HL>
496             <building:annual_energy_consumption uom="J">3.6e+10</building:
                    annual_energy_consumption>
497             <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
498             <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
499             <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
500             <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">6.48e+9</building:
                    annual_energy_demand_dhw>
501             <building:type>0</building:type>
502             <building:usage>0</building:usage>
503             <building:heating_system>2</building:heating_system>
504             <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
505             <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
506             <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
507             <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
508             <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
509             <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
510             <building:room_height uom="m">4</building:room_height>
511             <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
512             <building:net_floor_area uom="m^2">179.23</building:net_floor_area>
513             <building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
514             <building:layout>0</building:layout>
515             <building:construction_type>0</building:construction_type>
516             <building:attic>2</building:attic>
517             <building:dormer>0</building:dormer>
518             <building:cellar>1</building:cellar>
519             <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
520             <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
521             <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
522             <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
523             <building:circulation>0</building:circulation>
524             <building:loss_dhw_d uom="J">2.1937752e+9</building:loss_dhw_d>
525             <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
526             <building:HE_dhw_s uom="J">6.452279999999999e+7</building:HE_dhw_s>
527             <building:HE_dhw_g uom="J">1.935684e+8</building:HE_dhw_g>
528             <building:loss_heating_ce uom="J">2.1292523999999998e+9</building:
                    loss_heating_ce>
529             <building:loss_heating_d uom="J">1.129149e+10</building:loss_heating_d>
530             <building:HE_d uom="J">2.1937752e+9</building:HE_d>
531             <building:HE_g uom="J">7.097508e+8</building:HE_g>
532             <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">2078 2282 2419 2419 2402 [...]
                    1669 1840</building:heating_load>
533             <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">2078
```

```
                2282 2419 2419 2402 [...] 1669 1840</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                >
534             <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">2078
                    2282 2419 2419 2402 [...] 1669 1840</building:heating_load_no_heating_summer>
535             <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                    [...] 11700 11838</building:cooling_load>
536             <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
537             <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
538             <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 493 247 247 0 493
                    740 0 0 0 0 0 493 0 986 1233 0 0 [...] </building:dhw_load>
539         </building>
540         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="656408">
541             <building:linked_heat_pump>HP02</building:linked_heat_pump>
542             <building:which_SCoTED_input>2</building:which_SCoTED_input>
543             <building:which_HL>0</building:which_HL>
544             <building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption>
545             <building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
546             <building:dhw_profile_type>0</building:dhw_profile_type>
547             <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
548             <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">0</building:
                    annual_energy_demand_dhw>
549             <building:type>1</building:type>
550             <building:usage>9</building:usage>
551             <building:heating_system>0</building:heating_system>
552             <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
553             <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
554             <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
555             <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
556             <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
557             <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
558             <building:room_height uom="m">5.3</building:room_height>
559             <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
560             <building:net_floor_area uom="m^2">208.60</building:net_floor_area>
561             <building:neighbour_buildings>undefined</building:neighbour_buildings>
562             <building:layout>2</building:layout>
563             <building:construction_type>0</building:construction_type>
564             <building:attic>undefined</building:attic>
565             <building:dormer>undefined</building:dormer>
566             <building:cellar>undefined</building:cellar>
567             <building:window_layout>0</building:window_layout>
568             <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
569             <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
570             <building:T_standard_outside uom="K">0</building:T_standard_outside>
571             <building:circulation>0</building:circulation>
572             <building:loss_dhw_d uom="J">0e+0</building:loss_dhw_d>
573             <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
574             <building:HE_dhw_s uom="J">0e+0</building:HE_dhw_s>
575             <building:HE_dhw_g uom="J">0e+0</building:HE_dhw_g>
576             <building:loss_heating_ce uom="J">2.478168e+9</building:loss_heating_ce>
```

```
577         <building:loss_heating_d uom="J">1.3141800000000002e+10</building:loss_heating_d
                >
578         <building:HE_d uom="J">2.553264e+9</building:HE_d>
579         <building:HE_g uom="J">8.26056e+8</building:HE_g>
580         <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">618 724 858 992 9970 [...] 372
                562</building:heating_load>
581         <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">618
                724 858 992 9970 [...] 372 562</building:heating_load_corr_T_heating_limit>
582         <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">618 724
                858 992 9970 [...] 372 562</building:heating_load_no_heating_summer>
583         <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 [...] 0 0</building:
                cooling_load>
584         <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                annual_energy_consumption_cooling>
585         <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
586         <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
                0 0 0 0 0 0 [...] </building:dhw_load>
587     </building>
588     <building xmlns:building="URI-Building" building:id="655518">
589         <building:linked_heat_pump>HP03</building:linked_heat_pump>
590         <building:which_SCoTED_input>1</building:which_SCoTED_input>
591         <building:which_HL>1</building:which_HL>
592         <building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
                annual_energy_consumption>
593         <building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
594         <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
595         <building:norm_HL_12831 uom="W">10000</building:norm_HL_12831>
596         <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">1.502352e+10</building:
                annual_energy_demand_dhw>
597         <building:type>0</building:type>
598         <building:usage>0</building:usage>
599         <building:heating_system>0</building:heating_system>
600         <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
601         <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
602         <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
603         <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
604         <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
605         <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
606         <building:room_height uom="m">2.76</building:room_height>
607         <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
608         <building:net_floor_area uom="m^2">208.66</building:net_floor_area>
609         <building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
610         <building:layout>1</building:layout>
611         <building:construction_type>0</building:construction_type>
612         <building:attic>2</building:attic>
613         <building:dormer>0</building:dormer>
614         <building:cellar>1</building:cellar>
615         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
616         <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
617         <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
618         <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
```

```
619             <building:circulation>0</building:circulation>
620             <building:loss_dhw_d uom="J">0e+0</building:loss_dhw_d>
621             <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
622             <building:HE_dhw_s uom="J">0e+0</building:HE_dhw_s>
623             <building:HE_dhw_g uom="J">0e+0</building:HE_dhw_g>
624             <building:loss_heating_ce uom="J">1.2383712e+9</building:loss_heating_ce>
625             <building:loss_heating_d uom="J">6.56712e+9</building:loss_heating_d>
626             <building:HE_d uom="J">1.2758976e+9</building:HE_d>
627             <building:HE_g uom="J">4.1279040000000006e+8</building:HE_g>
628             <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">4207 4621 4897 4897 4862 [...]
                    3379 3724</building:heating_load>
629             <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">4207
                    4621 4897 4897 4862 [...] 3379 3724</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                    >
630             <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">4207
                    4621 4897 4897 4862 [...] 3379 3724</building:heating_load_no_heating_summer>
631             <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                     [...] 11700 11838</building:cooling_load>
632             <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
633             <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
634             <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1143 572 572 0 1143
                    1715 0 0 0 0 0 1143 0 2287 2858 0 0 [...] </building:dhw_load>
635         </building>
636         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="000011">
637             <building:linked_heat_pump>HP04</building:linked_heat_pump>
638             <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
639             <building:which_HL>1</building:which_HL>
640             <building:annual_energy_consumption uom="J">2.88e+10</building:
                    annual_energy_consumption>
641             <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
642             <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
643             <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
644             <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">5.184e+9</building:
                    annual_energy_demand_dhw>
645             <building:type>0</building:type>
646             <building:usage>0</building:usage>
647             <building:heating_system>0</building:heating_system>
648             <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
649             <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
650             <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
651             <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
652             <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
653             <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
654             <building:room_height uom="m">2.5</building:room_height>
655             <building:storeys_above_ground>2</building:storeys_above_ground>
656             <building:net_floor_area uom="m^2">100</building:net_floor_area>
657             <building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
658             <building:layout>1</building:layout>
659             <building:construction_type>0</building:construction_type>
660             <building:attic>2</building:attic>
```

```
661         <building:dormer>0</building:dormer>
662         <building:cellar>1</building:cellar>
663         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
664         <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
665         <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
666         <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
667         <building:circulation>0</building:circulation>
668         <building:loss_dhw_d uom="J">2.1937752e+9</building:loss_dhw_d>
669         <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
670         <building:HE_dhw_s uom="J">6.452279999999999e+7</building:HE_dhw_s>
671         <building:HE_dhw_g uom="J">1.935684e+8</building:HE_dhw_g>
672         <building:loss_heating_ce uom="J">2.1292523999999998e+9</building:
              loss_heating_ce>
673         <building:loss_heating_d uom="J">1.129149e+10</building:loss_heating_d>
674         <building:HE_d uom="J">2.1937752e+9</building:HE_d>
675         <building:HE_g uom="J">7.097508e+8</building:HE_g>
676         <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">1662 1826 1935 1935 1921 [...]
              1335 1472</building:heating_load>
677         <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">1662
              1826 1935 1935 1921 [...] 1335 1472</building:heating_load_corr_T_heating_limit
              >
678         <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">1662
              1826 1935 1935 1921 [...] 1335 1472</building:heating_load_no_heating_summer>
679         <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
               [...] 11700 11838</building:cooling_load>
680         <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
              annual_energy_consumption_cooling>
681         <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
              315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
682         <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 394 197 197 0 394
              592 0 0 0 0 0 394 0 789 986 0 0</building:dhw_load>
683     </building>
684     <building xmlns:building="URI-Building" building:id="655122">
685         <building:linked_heat_pump>HP05</building:linked_heat_pump>
686         <building:which_SCoTED_input>1</building:which_SCoTED_input>
687         <building:which_HL>2</building:which_HL>
688         <building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
              annual_energy_consumption>
689         <building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
690         <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
691         <building:norm_HL_12831 uom="W">10000</building:norm_HL_12831>
692         <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">1.630728e+10</building:
              annual_energy_demand_dhw>
693         <building:type>0</building:type>
694         <building:usage>0</building:usage>
695         <building:heating_system>0</building:heating_system>
696         <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
697         <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
698         <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
699         <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
700         <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
701         <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
```

```
<building:room_height uom="m">6.86</building:room_height>
<building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
<building:net_floor_area uom="m^2">226.49</building:net_floor_area>
<building:neighbour_buildings>1</building:neighbour_buildings>
<building:layout>0</building:layout>
<building:construction_type>0</building:construction_type>
<building:attic>2</building:attic>
<building:dormer>0</building:dormer>
<building:cellar>1</building:cellar>
<building:window_layout>undefined</building:window_layout>
<building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
<building:with_ahu>0</building:with_ahu>
<building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
<building:circulation>0</building:circulation>
<building:loss_dhw_d uom="J">2.7722376000000005e+9</building:loss_dhw_d>
<building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
<building:HE_dhw_s uom="J">8.15364e+7</building:HE_dhw_s>
<building:HE_dhw_g uom="J">2.4460920000000003e+8</building:HE_dhw_g>
<building:loss_heating_ce uom="J">2.6907012e+9</building:loss_heating_ce>
<building:loss_heating_d uom="J">1.4268869999999998e+10</building:loss_heating_d
    >
<building:HE_d uom="J">2.7722376000000005e+9</building:HE_d>
<building:HE_g uom="J">8.969004000000001e+8</building:HE_g>
<building:heating_load time_interval="3600" uom="W">4207 4621 4897 4897 4862 [...]
    3379 3724</building:heating_load>
<building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">4207
    4621 4897 4897 4862 [...] 3379 3724</building:heating_load_corr_T_heating_limit
    >
<building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">4207
    4621 4897 4897 4862 [...] 3379 3724</building:heating_load_no_heating_summer>
<building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
     [...] 11700 11838</building:cooling_load>
<building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
    annual_energy_consumption_cooling>
<building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
<building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1241 620 620 0 1241
    1862 0 0 0 0 0 1241 0 2482 3103 0 0 [...] </building:dhw_load>
</building>
<building xmlns:building="URI-Building" building:id="655131">
<building:linked_heat_pump>HP06</building:linked_heat_pump>
<building:which_SCoTED_input>2</building:which_SCoTED_input>
<building:which_HL>0</building:which_HL>
<building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
    annual_energy_consumption>
<building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
<building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
<building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
<building:annual_energy_demand_dhw uom="J">1.5567839999999998e+10</building:
    annual_energy_demand_dhw>
<building:type>0</building:type>
<building:usage>0</building:usage>
```

```
743             <building:heating_system>0</building:heating_system>
744             <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
745             <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
746             <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
747             <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
748             <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
749             <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
750             <building:room_height uom="m">3.16</building:room_height>
751             <building:storeys_above_ground>2</building:storeys_above_ground>
752             <building:net_floor_area uom="m^2">216.22</building:net_floor_area>
753             <building:neighbour_buildings>1</building:neighbour_buildings>
754             <building:layout>0</building:layout>
755             <building:construction_type>0</building:construction_type>
756             <building:attic>2</building:attic>
757             <building:dormer>0</building:dormer>
758             <building:cellar>1</building:cellar>
759             <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
760             <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
761             <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
762             <building:T_standard_outside uom="K">0</building:T_standard_outside>
763             <building:circulation>0</building:circulation>
764             <building:loss_dhw_d uom="J">2.6465328e+9</building:loss_dhw_d>
765             <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
766             <building:HE_dhw_s uom="J">7.78392e+7</building:HE_dhw_s>
767             <building:HE_dhw_g uom="J">2.3351760000000003e+8</building:HE_dhw_g>
768             <building:loss_heating_ce uom="J">2.5686936e+9</building:loss_heating_ce>
769             <building:loss_heating_d uom="J">1.362186e+10</building:loss_heating_d>
770             <building:HE_d uom="J">2.6465328e+9</building:HE_d>
771             <building:HE_g uom="J">8.562312e+8</building:HE_g>
772             <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">5725 5658 5676 5693 5709 [...]
                    5811 5948</building:heating_load>
773             <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">5725
                    5658 5676 5693 5709 [...] 5811 5948</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                    >
774             <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">5725
                    5658 5676 5693 5709 [...] 5811 5948</building:heating_load_no_heating_summer>
775             <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 [...] 0 0</building:
                    cooling_load>
776             <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
777             <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
778             <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1185 592 592 0 1185
                    1777 0 0 0 0 0 1185 0 2370 2962 0 0 [...] </building:dhw_load>
779         </building>
780         <building xmlns:building="URI-Building" building:id="657864">
781             <building:linked_heat_pump>HP07</building:linked_heat_pump>
782             <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
783             <building:which_HL>1</building:which_HL>
784             <building:annual_energy_consumption uom="J">3.6e+10</building:
                    annual_energy_consumption>
785             <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
```

```
786         <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
787         <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
788         <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">6.48e+9</building:
                annual_energy_demand_dhw>
789         <building:type>0</building:type>
790         <building:usage>0</building:usage>
791         <building:heating_system>0</building:heating_system>
792         <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
793         <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
794         <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
795         <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
796         <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
797         <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
798         <building:room_height uom="m">5.36</building:room_height>
799         <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
800         <building:net_floor_area uom="m^2">161.60</building:net_floor_area>
801         <building:neighbour_buildings>2</building:neighbour_buildings>
802         <building:layout>1</building:layout>
803         <building:construction_type>0</building:construction_type>
804         <building:attic>2</building:attic>
805         <building:dormer>0</building:dormer>
806         <building:cellar>1</building:cellar>
807         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
808         <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
809         <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
810         <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
811         <building:circulation>0</building:circulation>
812         <building:loss_dhw_d uom="J">1.9779840000000002e+9</building:loss_dhw_d>
813         <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
814         <building:HE_dhw_s uom="J">5.8176e+7</building:HE_dhw_s>
815         <building:HE_dhw_g uom="J">1.74528e+8</building:HE_dhw_g>
816         <building:loss_heating_ce uom="J">7.843176000000001e+8</building:loss_heating_ce
                >
817         <building:loss_heating_d uom="J">4.15926e+9</building:loss_heating_d>
818         <building:HE_d uom="J">8.080848e+8</building:HE_d>
819         <building:HE_g uom="J">2.6143920000000003e+8</building:HE_g>
820         <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">2078 2282 2419 2419 2402 [...]
                1669 1840</building:heating_load>
821         <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">2078
                2282 2419 2419 2402 [...] 1669 1840</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                >
822         <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">2078
                2282 2419 2419 2402 [...] 1669 1840</building:heating_load_no_heating_summer>
823         <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                 [...] 11700 11838</building:cooling_load>
824         <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                annual_energy_consumption_cooling>
825         <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
826         <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 493 247 247 0 493
                740 0 0 0 0 0 493 0 986 1233 0 0 [...] </building:dhw_load>
827     </building>
```

```
828 <building xmlns:building="URI-Building" building:id="661433">
829     <building:linked_heat_pump>HP08</building:linked_heat_pump>
830     <building:which_SCoTED_input>2</building:which_SCoTED_input>
831     <building:which_HL>0</building:which_HL>
832     <building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
            annual_energy_consumption>
833     <building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
834     <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
835     <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
836     <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">1.6950960000000002e+10</building:
            annual_energy_demand_dhw>
837     <building:type>0</building:type>
838     <building:usage>0</building:usage>
839     <building:heating_system>0</building:heating_system>
840     <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
841     <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
842     <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
843     <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
844     <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
845     <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
846     <building:room_height uom="m">4</building:room_height>
847     <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
848     <building:net_floor_area uom="m^2">235.43</building:net_floor_area>
849     <building:neighbour_buildings>1</building:neighbour_buildings>
850     <building:layout>0</building:layout>
851     <building:construction_type>0</building:construction_type>
852     <building:attic>2</building:attic>
853     <building:dormer>0</building:dormer>
854     <building:cellar>1</building:cellar>
855     <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
856     <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
857     <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
858     <building:T_standard_outside uom="K">0</building:T_standard_outside>
859     <building:circulation>0</building:circulation>
860     <building:loss_dhw_d uom="J">2.8816632e+9</building:loss_dhw_d>
861     <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
862     <building:HE_dhw_s uom="J">8.47548e+7</building:HE_dhw_s>
863     <building:HE_dhw_g uom="J">2.5426440000000003e+8</building:HE_dhw_g>
864     <building:loss_heating_ce uom="J">2.7969084e+9</building:loss_heating_ce>
865     <building:loss_heating_d uom="J">1.4832089999999998e+10</building:loss_heating_d
            >
866     <building:HE_d uom="J">2.8816632e+9</building:HE_d>
867     <building:HE_g uom="J">9.323028e+8</building:HE_g>
868     <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">7458
            7358 7369 7381 7392 [...] 7614 7751</building:heating_load_corr_T_heating_limit
            >
869     <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">7458 7358 7369 7381 7392 [...]
            7614 7751</building:heating_load>
870     <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">7458
            7358 7369 7381 7392 [...] 7614 7751</building:heating_load_no_heating_summer>
871     <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 [...] 0 0</building:
            cooling_load>
```

```
872         <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                annual_energy_consumption_cooling>
873         <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
874         <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1290 645 645 0 1290
                1935 0 0 0 0 0 1290 0 2580 3225 0 0 [...] </building:dhw_load>
875     </building>
876     <building xmlns:building="URI-Building" building:id="658081">
877         <building:linked_heat_pump>HP09</building:linked_heat_pump>
878         <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
879         <building:which_HL>1</building:which_HL>
880         <building:annual_energy_consumption uom="J">4.32e+10</building:
                annual_energy_consumption>
881         <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
882         <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
883         <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
884         <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">7.776e+9</building:
                annual_energy_demand_dhw>
885         <building:type>0</building:type>
886         <building:usage>0</building:usage>
887         <building:heating_system>0</building:heating_system>
888         <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
889         <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
890         <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
891         <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
892         <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
893         <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
894         <building:room_height uom="m">4.57</building:room_height>
895         <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
896         <building:net_floor_area uom="m^2">190.59</building:net_floor_area>
897         <building:neighbour_buildings>1</building:neighbour_buildings>
898         <building:layout>0</building:layout>
899         <building:construction_type>0</building:construction_type>
900         <building:attic>2</building:attic>
901         <building:dormer>0</building:dormer>
902         <building:cellar>1</building:cellar>
903         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
904         <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
905         <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
906         <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
907         <building:circulation>0</building:circulation>
908         <building:loss_dhw_d uom="J">2.3328216e+9</building:loss_dhw_d>
909         <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
910         <building:HE_dhw_s uom="J">6.861240000000001e+7</building:HE_dhw_s>
911         <building:HE_dhw_g uom="J">2.058372e+8</building:HE_dhw_g>
912         <building:loss_heating_ce uom="J">2.2642092e+9</building:loss_heating_ce>
913         <building:loss_heating_d uom="J">1.200717e+10</building:loss_heating_d>
914         <building:HE_d uom="J">2.3328216e+9</building:HE_d>
915         <building:HE_g uom="J">7.547364e+8</building:HE_g>
916         <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">2494 2739 2902 2902 2882 [...]
                2003 2207</building:heating_load>
917         <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">2494
```

```
2739 2902 2902 2882 [...] 2003 2207</building:heating_load_corr_T_heating_limit
>
<building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">2494
2739 2902 2902 2882 [...] 2003 2207</building:heating_load_no_heating_summer>
<building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
[...] 11700 11838</building:cooling_load>
<building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
annual_energy_consumption_cooling>
<building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
<building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 592 296 296 0 592
888 0 0 0 0 0 592 0 1184 1480 0 0 [...] </building:dhw_load>
</building>
<building xmlns:building="URI-Building" building:id="656420">
<building:linked_heat_pump>HP10</building:linked_heat_pump>
<building:which_SCoTED_input>2</building:which_SCoTED_input>
<building:which_HL>2</building:which_HL>
<building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
annual_energy_consumption>
<building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
<building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
<building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
<building:annual_energy_demand_dhw uom="J">1.4887439999999998e+10</building:
annual_energy_demand_dhw>
<building:type>0</building:type>
<building:usage>0</building:usage>
<building:heating_system>1</building:heating_system>
<building:T_heating_system uom="K">328.15</building:T_heating_system>
<building:Tmin_heating_system uom="K">313.15</building:Tmin_heating_system>
<building:Tmax_heating_system uom="K">328.15</building:Tmax_heating_system>
<building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
<building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
<building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
<building:room_height uom="m">4.34</building:room_height>
<building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
<building:net_floor_area uom="m^2">206.77</building:net_floor_area>
<building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
<building:layout>0</building:layout>
<building:construction_type>0</building:construction_type>
<building:attic>2</building:attic>
<building:dormer>0</building:dormer>
<building:cellar>1</building:cellar>
<building:window_layout>undefined</building:window_layout>
<building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
<building:with_ahu>0</building:with_ahu>
<building:T_standard_outside uom="K">0</building:T_standard_outside>
<building:circulation>0</building:circulation>
<building:loss_dhw_d uom="J">2.5308648000000005e+9</building:loss_dhw_d>
<building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
<building:HE_dhw_s uom="J">7.44372e+7</building:HE_dhw_s>
<building:HE_dhw_g uom="J">2.233116e+8</building:HE_dhw_g>
<building:loss_heating_ce uom="J">2.4564276e+9</building:loss_heating_ce>
```

```
961         <building:loss_heating_d uom="J">1.302651e+10</building:loss_heating_d>
962         <building:HE_d uom="J">2.5308648000000005e+9</building:HE_d>
963         <building:HE_g uom="J">8.188092e+8</building:HE_g>
964         <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">7110 7014 7022 7031 7039 [...]
                7266 7379</building:heating_load>
965         <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">7110
                7014 7022 7031 7039 [...] 7266 7379</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                >
966         <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">7110
                7014 7022 7031 7039 [...] 7266 7379</building:heating_load_no_heating_summer>
967         <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 [...] 0 0</building:
                cooling_load>
968         <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                annual_energy_consumption_cooling>
969         <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
970         <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1133 566 566 0 1133
                1700 0 0 0 0 0 1133 0 2266 2832 0 0 [...] </building:dhw_load>
971     </building>
972     <building xmlns:building="URI-Building" building:id="658285">
973         <building:linked_heat_pump>HP11</building:linked_heat_pump>
974         <building:which_SCoTED_input>0</building:which_SCoTED_input>
975         <building:which_HL>1</building:which_HL>
976         <building:annual_energy_consumption uom="J">5.04e+10</building:
                annual_energy_consumption>
977         <building:percentage_dhw>0.18</building:percentage_dhw>
978         <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
979         <building:norm_HL_12831 uom="W">0</building:norm_HL_12831>
980         <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">9.072e+9</building:
                annual_energy_demand_dhw>
981         <building:type>0</building:type>
982         <building:usage>0</building:usage>
983         <building:heating_system>0</building:heating_system>
984         <building:T_heating_system uom="K">308.15</building:T_heating_system>
985         <building:Tmin_heating_system uom="K">298.15</building:Tmin_heating_system>
986         <building:Tmax_heating_system uom="K">308.15</building:Tmax_heating_system>
987         <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
988         <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
989         <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
990         <building:room_height uom="m">4.31</building:room_height>
991         <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
992         <building:net_floor_area uom="m^2">154.72</building:net_floor_area>
993         <building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
994         <building:layout>1</building:layout>
995         <building:construction_type>0</building:construction_type>
996         <building:attic>2</building:attic>
997         <building:dormer>0</building:dormer>
998         <building:cellar>1</building:cellar>
999         <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
1000        <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
1001        <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
1002        <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
```

```
1003            <building:circulation>0</building:circulation>
1004            <building:loss_dhw_d uom="J">1.8937728e+9</building:loss_dhw_d>
1005            <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
1006            <building:HE_dhw_s uom="J">5.56992e+7</building:HE_dhw_s>
1007            <building:HE_dhw_g uom="J">1.670976e+8</building:HE_dhw_g>
1008            <building:loss_heating_ce uom="J">8.822088e+8</building:loss_heating_ce>
1009            <building:loss_heating_d uom="J">4.67838e+9</building:loss_heating_d>
1010            <building:HE_d uom="J">9.089424e+8</building:HE_d>
1011            <building:HE_g uom="J">2.9406960000000006e+8</building:HE_g>
1012            <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">2909 3195 3386 3386 3362 [...]
                    2337 2575</building:heating_load>
1013            <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">2909
                    3195 3386 3386 3362 [...] 2337 2575</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                    >
1014            <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">2909
                    3195 3386 3386 3362 [...] 2337 2575</building:heating_load_no_heating_summer>
1015            <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                     [...] 11700 11838</building:cooling_load>
1016            <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
1017            <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
1018            <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 690 345 345 0 690
                    1036 0 0 0 0 0 690 0 1381 1726 0 0 [...] </building:dhw_load>
1019        </building>
1020        <building xmlns:building="URI-Building" building:id="660687">
1021            <building:linked_heat_pump>HP12</building:linked_heat_pump>
1022            <building:which_SCoTED_input>1</building:which_SCoTED_input>
1023            <building:which_HL>1</building:which_HL>
1024            <building:annual_energy_consumption uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption>
1025            <building:percentage_dhw>NaN</building:percentage_dhw>
1026            <building:dhw_profile_type>1</building:dhw_profile_type>
1027            <building:norm_HL_12831 uom="W">20000</building:norm_HL_12831>
1028            <building:annual_energy_demand_dhw uom="J">2.457072e+10</building:
                    annual_energy_demand_dhw>
1029            <building:type>0</building:type>
1030            <building:usage>0</building:usage>
1031            <building:heating_system>0</building:heating_system>
1032            <building:T_heating_system uom="K">338.15</building:T_heating_system>
1033            <building:Tmin_heating_system uom="K">328.15</building:Tmin_heating_system>
1034            <building:Tmax_heating_system uom="K">338.15</building:Tmax_heating_system>
1035            <building:T_heating_limit uom="K">288.15</building:T_heating_limit>
1036            <building:year_of_construction>1995</building:year_of_construction>
1037            <building:year_of_retrofit>undefined</building:year_of_retrofit>
1038            <building:room_height uom="m">5.2</building:room_height>
1039            <building:storeys_above_ground>1</building:storeys_above_ground>
1040            <building:net_floor_area uom="m^2">341.26</building:net_floor_area>
1041            <building:neighbour_buildings>0</building:neighbour_buildings>
1042            <building:layout>0</building:layout>
1043            <building:construction_type>0</building:construction_type>
1044            <building:attic>2</building:attic>
```

```
1045            <building:dormer>0</building:dormer>
1046            <building:cellar>1</building:cellar>
1047            <building:window_layout>undefined</building:window_layout>
1048            <building:number_of_apartments>undefined</building:number_of_apartments>
1049            <building:with_ahu>0</building:with_ahu>
1050            <building:T_standard_outside uom="K">259.15</building:T_standard_outside>
1051            <building:circulation>0</building:circulation>
1052            <building:loss_dhw_d uom="J">4.177022400000001e+9</building:loss_dhw_d>
1053            <building:HE_dhw_d uom="J">0e+0</building:HE_dhw_d>
1054            <building:HE_dhw_s uom="J">1.228536e+8</building:HE_dhw_s>
1055            <building:HE_dhw_g uom="J">3.685608e+8</building:HE_dhw_g>
1056            <building:loss_heating_ce uom="J">4.0541688e+9</building:loss_heating_ce>
1057            <building:loss_heating_d uom="J">2.149938e+10</building:loss_heating_d>
1058            <building:HE_d uom="J">4.177022400000001e+9</building:HE_d>
1059            <building:HE_g uom="J">1.3513896000000002e+9</building:HE_g>
1060            <building:heating_load time_interval="3600" uom="W">8414 9241 9793 9793 9724 [...]
                    6759 7448</building:heating_load>
1061            <building:heating_load_corr_T_heating_limit time_interval="3600" uom="W">8414
                    9241 9793 9793 9724 [...] 6759 7448</building:heating_load_corr_T_heating_limit
                    >
1062            <building:heating_load_no_heating_summer time_interval="3600" uom="W">8414
                    9241 9793 9793 9724 [...] 6759 7448</building:heating_load_no_heating_summer>
1063            <building:cooling_load time_interval="3600" uom="W">10000 20251 20612 20928 20919
                     [...] 11700 11838</building:cooling_load>
1064            <building:annual_energy_consumption_cooling uom="J">0</building:
                    annual_energy_consumption_cooling>
1065            <building:dhw_profile time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 210 105 105 0 210
                    315 0 0 0 0 0 210 0 420 525 0 0 [...] </building:dhw_profile>
1066            <building:dhw_load time_interval="3600" uom="W">0 0 0 0 0 0 0 1870 935 935 0 1870
                    2805 0 0 0 0 0 1870 0 3740 4675 0 0 [...] </building:dhw_load>
1067        </building>
1068    </BuildingCollection>
1069    <ThermalResponseData xmlns:trd="URI-TRT">
1070        <trd:lambda_effective uom="W/mK"/>
1071        <trd:ground_volumetric_heat_capacity uom="J/m^3K"/>
1072        <trd:undisturbed_ground_temperature uom="K"/>
1073        <trd:borehole_thermal_resistance uom="mK/W"/>
1074    </ThermalResponseData>
1075    <SimulationSetup xmlns:simbuild="URI-SimBuild" xmlns:simhp="URI-HeatPump" xmlns:
            simsoil="URI-SimSoil">
1076        <simbuild:start_time uom="s">0</simbuild:start_time>
1077        <simbuild:end_time uom="s">31536000</simbuild:end_time>
1078        <simbuild:time_step uom="s">3600</simbuild:time_step>
1079        <simbuild:weather_data>TRY2015_37605002680500_Jahr</simbuild:weather_data>
1080        <simsoil:domain_height uom="m">130</simsoil:domain_height>
1081        <simsoil:start_time uom="s">0</simsoil:start_time>
1082        <simsoil:end_time uom="s">1576800000</simsoil:end_time>
1083        <simhp:dt_comm uom="s">60</simhp:dt_comm>
1084    </SimulationSetup>
1085    <GroundWaterCollection>
1086        <Horizon xmlns:ground_water="URI-GroundWater" ground_water:id="horizon01">
1087            <ground_water:linked_layers>s01</ground_water:linked_layers>
```

```
1088            <ground_water:linked_layers>s02</ground_water:linked_layers>
1089            <ground_water:linked_layers>s03</ground_water:linked_layers>
1090            <ground_water:linked_layers>s04</ground_water:linked_layers>
1091            <ground_water:linked_layers>s05</ground_water:linked_layers>
1092            <ground_water:linked_layers>s06</ground_water:linked_layers>
1093            <ground_water:linked_layers>s07</ground_water:linked_layers>
1094            <ground_water:linked_layers>s08</ground_water:linked_layers>
1095        </Horizon>
1096    </GroundWaterCollection>
1097 </getisData>
```

F.2. Konfigurationsrandbedingungen

Abb. F.1.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich der Haustechnikfunktionen

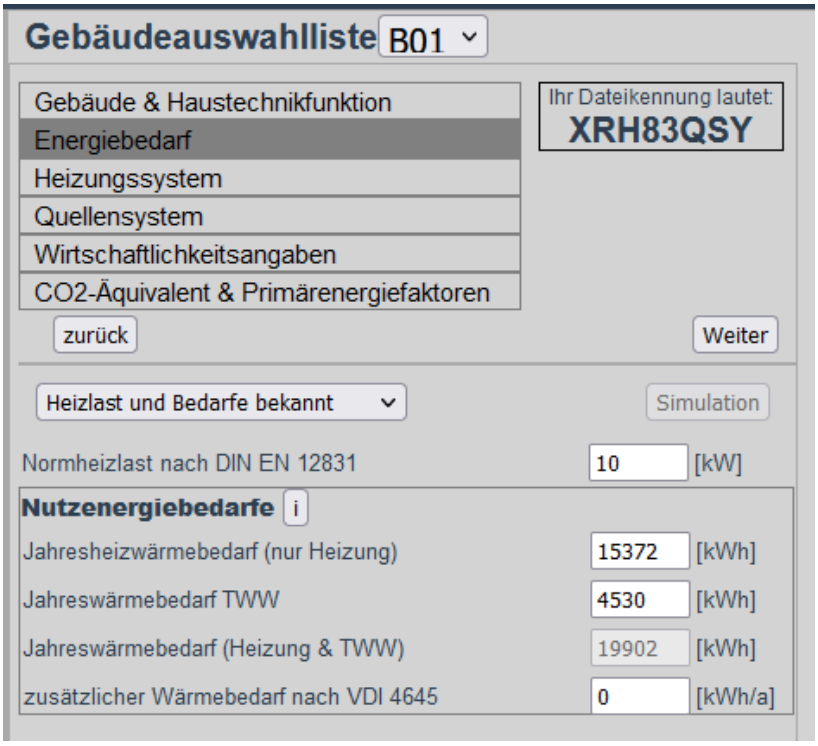


Abb. F.2.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich des Energiebedarfs

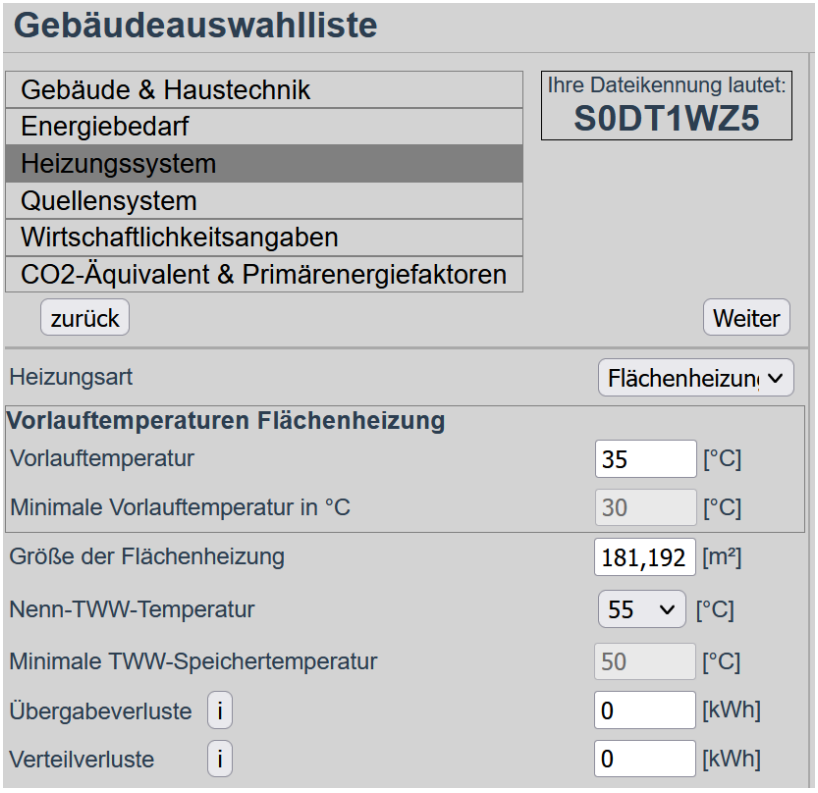


Abb. F.3.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich des Heizungssystems

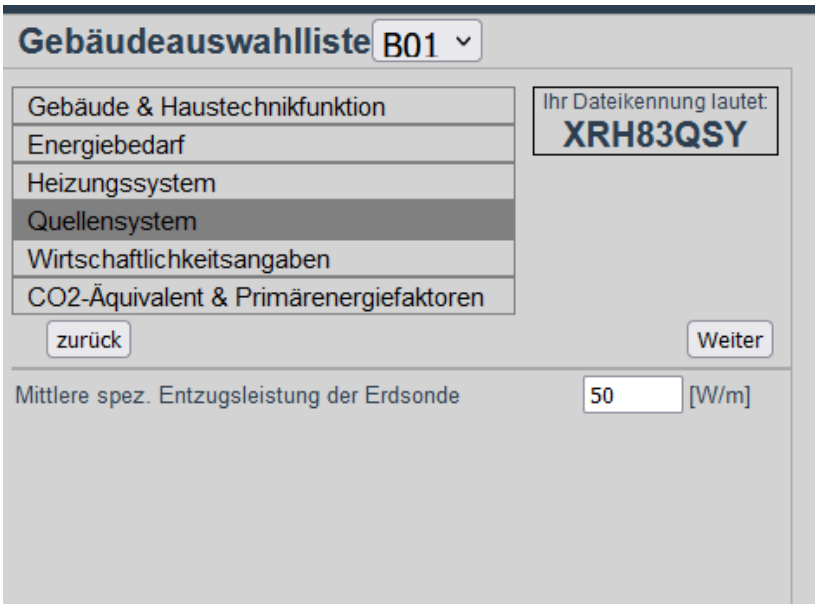


Abb. F.4.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich des Quellensystems

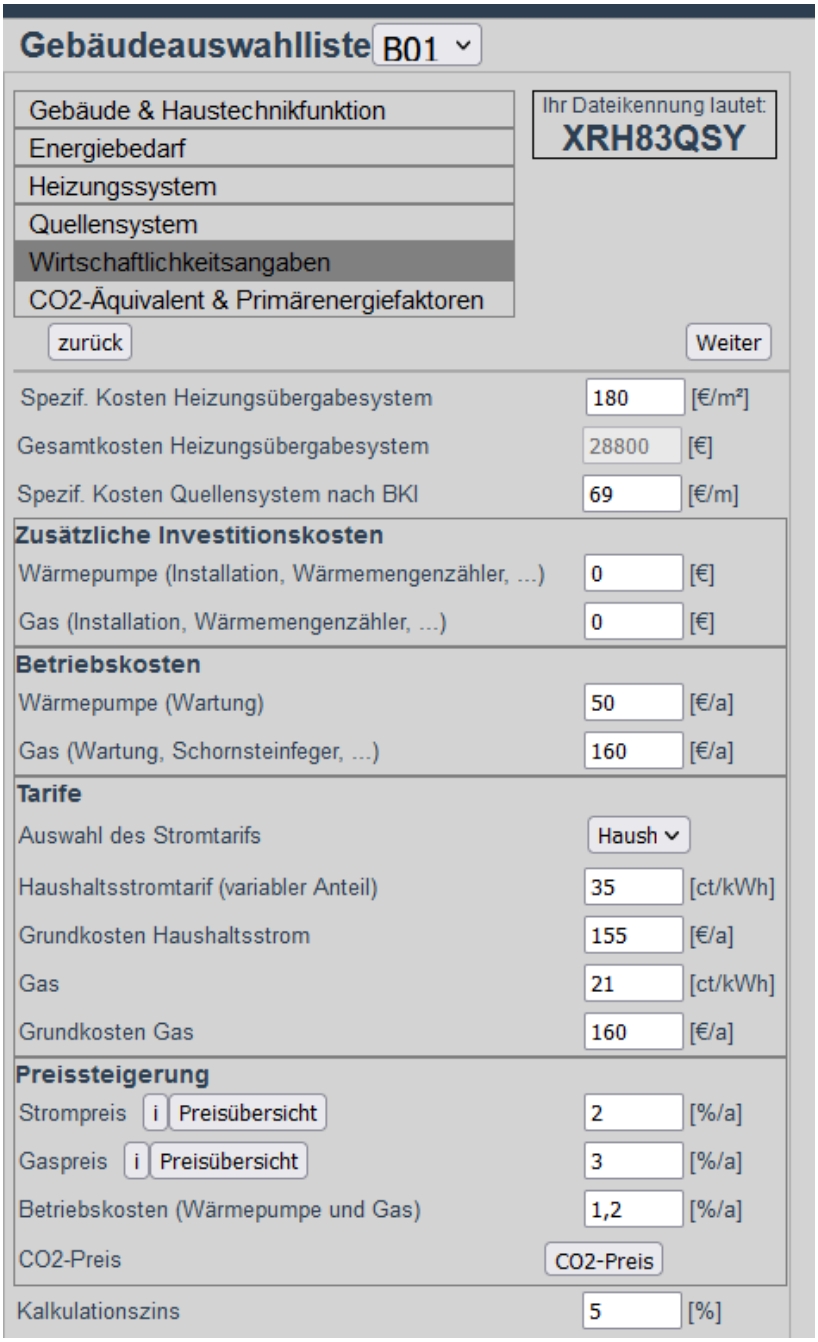


Abb. F.5.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich der Wirtschaftlichkeitsanalyse

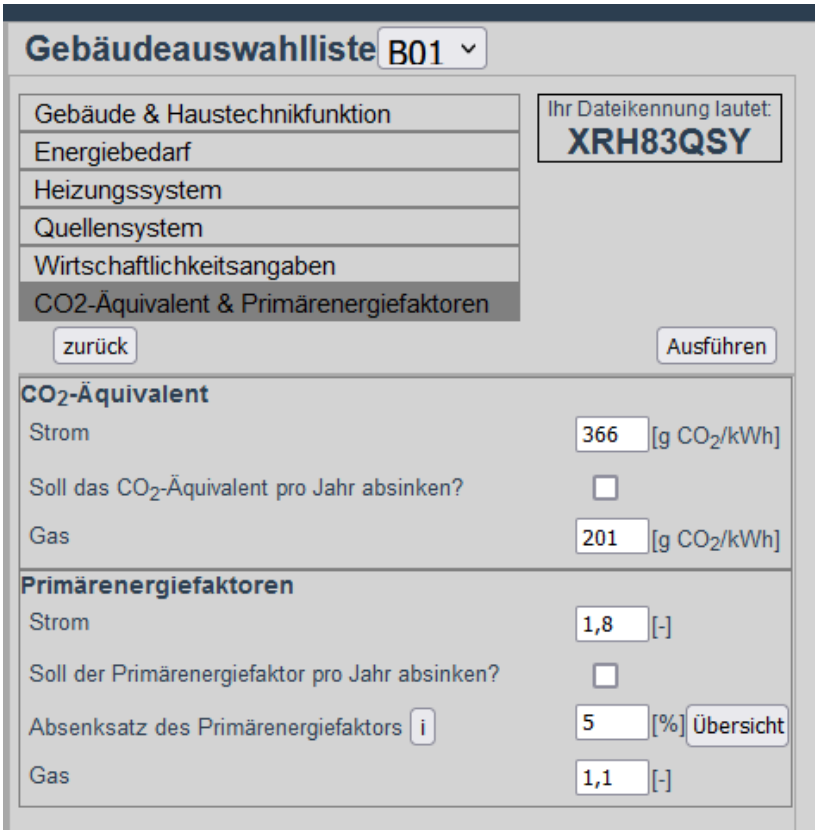


Abb. F.6.: Randbedingungen der Konfiguration des Gebäudes *655122* bezüglich der THG- und Primärenergiebilanz

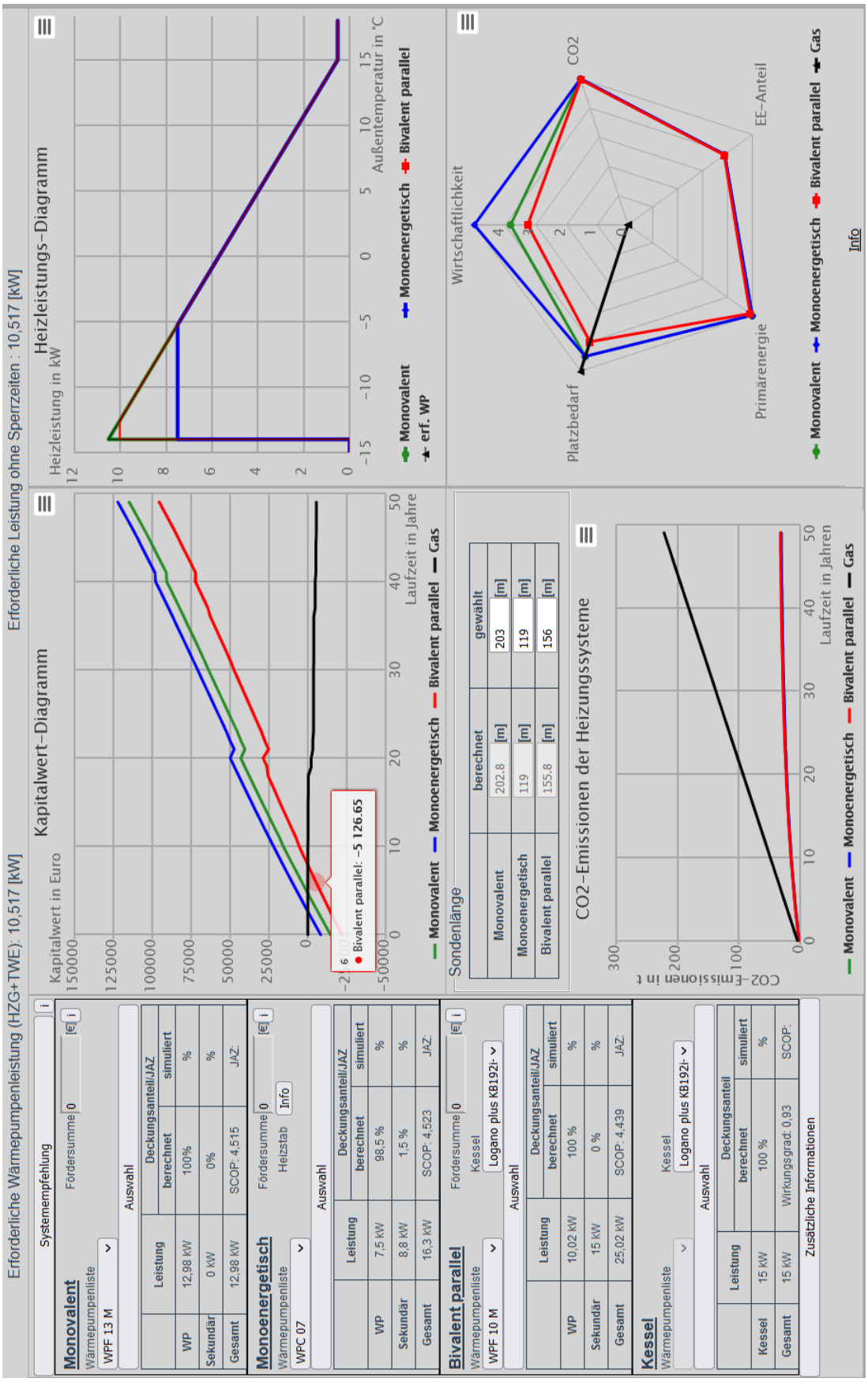


Abb. F.7.: Konfigurationsergebnisse des Gebäudes *655122*

Tab. F.1.: Gesamtinvestitionskostenvergleich der im Fallbeispiel betrachteten Systeme ohne Förderung und inklusive Kosten für Speicher(ggf. Kosten für zusätzliche Wärmedämmung), das Heizungsübergabesystem, das Ausdehnungsgefäß, die Zirkulationspumpe (zwischen Wärmeerzeuger und Speicher), einen Schornstein und die Erdwärmesonden

Systemvariante	Investitionskosten in €
Gasbrennwertsystem	44.852 €
WPF 13 M	59.397 €
WPC 07	53.089 €
WPF 07	54.499 €
WPC 05	50.469 €
WPC 04	48.888 €

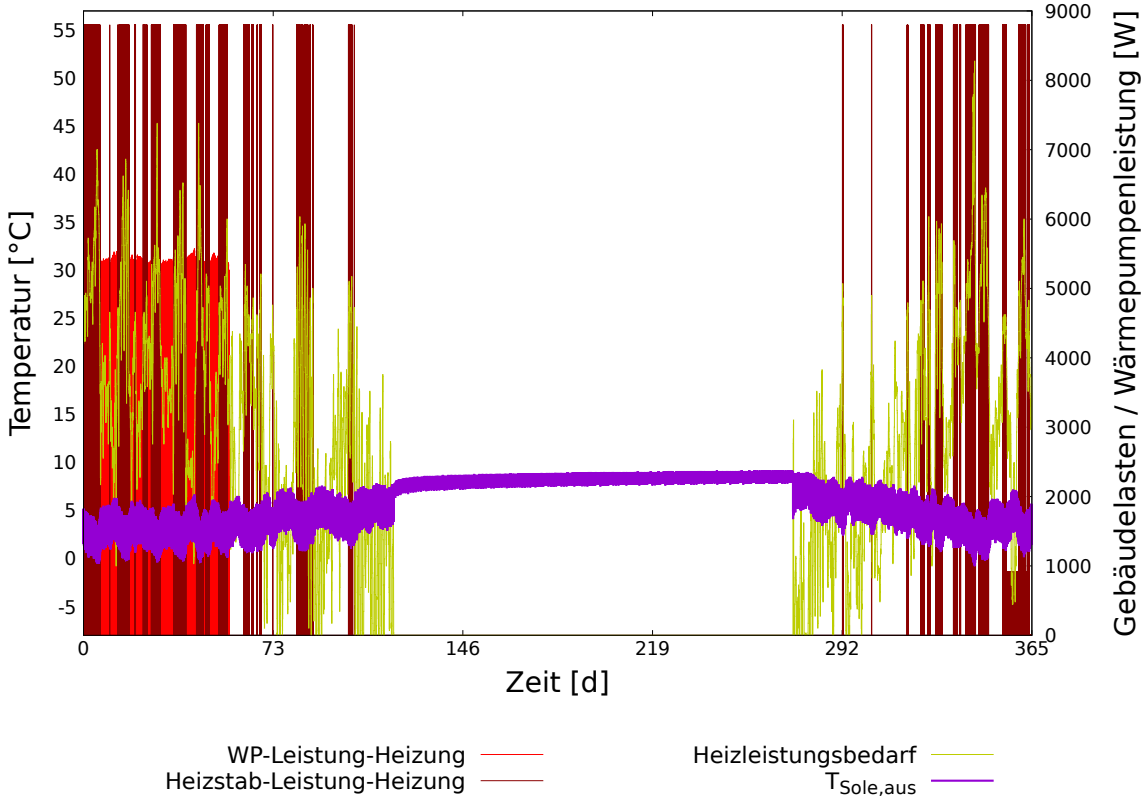


Abb. F.8.: Simulationsergebnisse von ModHPS für die Wärmepumpe *WPC 04* anhand des Lastprofils des Gebäudes *655122* und des Soleaustrittstemperaturprofils aus der gekoppelten Simulation von ModHPS und MPFluidGeTIS des fünfzehnten simulierten Jahres